

REPUBLIQUE TUNISIENNE

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

Direction des Ressources en Eau et en Sol

Division des Sols

Application de la méthode électrique à l'Etude de la salure des Sols

M. EL OUMRI

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Mission en Tunisie



AOUT 1978

AVANT - PROPOS

Avant d'aborder l'exposé qui suit, je voudrais remercier toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier très vivement Monsieur J. VIEILLEFON, qui m'a prodigué tout au long de l'année ses conseils et ses suggestions, qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Je remercie tout le personnel scientifique et technique de l'ORSTOM d'avoir travaillé dans une atmosphère de grande amitié. J'ai cité Monsieur DELHUMEAU et MONSIEUR SUSINI.

Je remercie également le Gouvernement Tunisien de m'avoir facilité la tâche et permis d'utiliser une parcelle d'essai du périmètre irrigué d'EL HABIBIA.

Que Monsieur HAMZA et Monsieur MAMI, ainsi que les techniciens du Laboratoire d'Analyse des Sols de l'Ariana, soient ici vivement remerciés.

S O M M A I R E

	Pages
AVANT-PROPOS	
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE	2
I - TECHNIQUE DE LA MESURE	3
A - Méthode quadripôle (horizontale)	3
B - Méthode verticale : Sonde électrique	3
1. - La constante k'	4
2. - Facteur de correction de la température	4
II - RESULTATS DES CAMPAGNES DE MESURES DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE APPARENTE (ECa) ET REPRESENTATION	6
A - Comparaison entre la méthode quadripôle et verticale	6
1. - Site SOUKRA	6
2. - Site EL HABIBIA	7
a_1 - Profondeur d'investigation et volume du sol prospecté	8
a_2 - Facteur géométrique k	9
3. - Site MATEUR	10
B - Représentation des données de la conductivité électrique apparente (ECa)	11
1. - Représentation verticale	11
a_1 - Profil salin des différents sols salés à alcalis	11
a_2 - Profil électrique et nature du matériau	12
a_3 - Profil d'ECa et niveau de battement de la nappe	13
a_4 - Comparaison des profils salins entre eux	14
a_5 - Représentation verticale et lessivage des sels	15
2. - Représentation horizontale	16
a_1 - Planche n° 1 (0 - 10 cm)	16
a_2 - Planche n° 2 (20 - 30 cm)	17
a_3 - Planche n° 3 (30 - 40 cm)	17
a_4 - Planche n° 4 (60 - 70 cm)	17
a_5 - Planche n° 5 (90 - 100 cm)	18
a_6 - Planche n° 6 (110 - 120 cm)	18

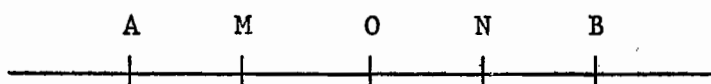
	Pages
C - Profils pédologiques et profils électriques	20
1. - Profil n° 17A	20
2. - Profil n° 8	21
3. - Profil n° 15	25
4. - Profil n° 35	27
5. - Profil n° 39	29
6. - Profil n° 24 A	29
D - Coupes verticales des courbes d'isohyales	33
E - Variation d'ECa dans le temps	33
1. - Figure n° 14	34
2. - Figure n° 15	34
3. - Figure n° 16	35
DEUXIEME PARTIE	38
III - ETUDE DES RELATIONS ENTRE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DE L'EXTRAIT SATURE (ECe) ET LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE APPARENTE (ECa)	39
A - Etalonnage à la tarière	39
1 - Site SOUKRA : Sols salés sableux	39
2.- Site EL HABIBIA : Sols salés argileux	39
a ₁ - Les facteurs de variations d'ECa (amélioration du rapport ECe/ECa)	40
a ₂ - Relation entre le rapport ECe/ECa et θ (pourcentage d'eau)	41
a ₂₁ - Sols à faible pourcentage d'eau	41
a ₂₂ - Sols à capacité au champ	43
a ₂₃ - Sols à saturation	43
3.- Site de MATEUR	44
B - Etalonnage à saturation	47

	Pages
TROISIEME PARTIE	50
IV - RELATION ECa ET TENEUR EN SELS	51
A - Calculs	51
B - Résultats	52
1. - Zone I	52
2. - Zone II	52
3. - Zone III	52
C - Discussion	53
V - CONCLUSION	55
BIBLIOGRAPHIE	58

I N T R O D U C T I O N

La résistivité apparente des couches de sol est la résistance d'un volume de sol de section et de longueur unité. Elle est exprimée en ohm/m/m2.

Pour mesurer la résistivité, on injecte un courant (alternatif ou continu) d'intensité "I" par les électrodes extérieures (A,B), symétriques par rapport au centre du dispositif "O", et on mesure entre les deux électrodes intérieures (M,N), symétriques également par rapport à "O" la différence de potentiel " ΔV ", engendré par le champ électrique créé par les électrodes extérieures.



Connaissant la résistance d'une tranche du sol la résistivité est :

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$$

ou

$$\rho_a = k R$$

ρ_a = résistivité en Ω/m

k = facteur géométrique du dispositif

R = résistance en Ω

Le facteur géométrique "k" dépend de l'écartement des électrodes (pour plus de détails, voir rapport 2ème année ORSTOM - EL IDRISSI - 1977).

Si les électrodes d'injection sont proches l'une de l'autre, les lignes des équipotentielles du champ seront limitées à la tranche superficielle du sol et la résistivité sera proche de celle de surface. Par contre si les électrodes s'éloignent progressivement la circulation du courant se fera de plus en plus profondément et la résistivité tendra à prendre en compte la valeur des résistivités du terrain de plus en plus profonde.

Pour plus de commodité, comme la salure est ordinairement exprimée par la conductivité de son extrait, qui varie plus ou moins proportionnellement avec la teneur en sels, on transforme la mesure précédente en conductivité électrique apparente par la relation suivante :

$$ECa = \frac{10}{\rho_a}$$

Eca = conductivité électrique apparente en mmhos/cm

ρ_a = résistivité apparente en Ω/m

PREMIERE PARTIE

I - TECHNIQUE DE LA MESURE

A - METHODE QUADRIPOLE (HORIZONTALE)

Pour les mesures horizontales, nous disposons de deux méthodes : Wenner et Schlumberger.

La résistivité apparente pour chaque méthode dépend de la géométrie du dispositif.

Pour Schlumberger, l'épaisseur prospectée est de 2 à 4 fois plus petite que AB ($e = AB/2-4$).

Pour Wenner on estime que cette profondeur est de $AB/3=a$.

La comparaison des courbes de résistivité en fonction de la profondeur pour les deux méthodes montre que, la résistivité mesurée par la méthode Wenner est inférieure à celle mesurée par la méthode Schlumberger (figure n° 1).

La méthode Wenner a été retenue dans les campagnes de mesures horizontales.

B - METHODE VERTICALE : SONDE ELECTRIQUE

Le principe est le même que dans la méthode horizontale ; on injecte un courant par deux électrodes et on mesure la " ΔV " par les deux autres (les électrodes sont des anneaux fixes, espacés de 2,6 cm).

Ces électrodes sont fixées sur une canne que l'on enfonce progressivement dans le sol jusqu'à la profondeur désirée. (Réf. RHOADES, VAN SCHILF GAAD 1976, pour les détails de construction).

Pour cette méthode verticale la conductivité électrique apparente est donnée par la formule suivante :

$$ECa_{25} = k' \frac{ft}{Rt}$$

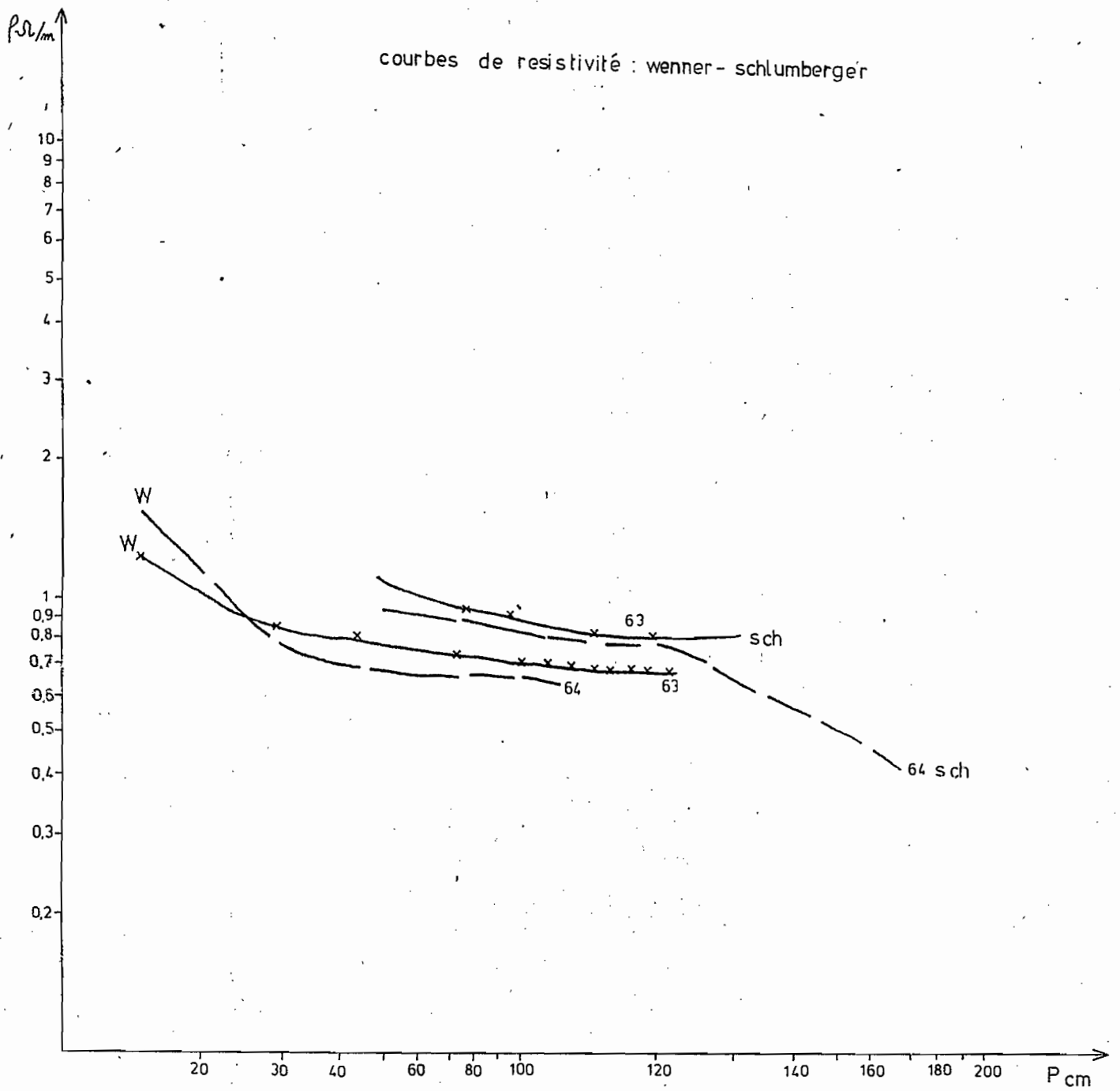
ECa_{25} = conductivité électrique apparente à 25°C

k' = constante de la sonde

ft = facteur de correction de la température

Rt = résistance mesurée à la température " t "

Fig. 1



1) La constante k'

La constante k' de la sonde a été déterminée empiriquement au laboratoire, en plongeant la sonde dans des solutions à différentes concentrations de sels et de conductivité électrique connue, puis on mesure la résistance des solutions.

Connaissant la conductivité électrique et la résistance on détermine k' (figure n° 2) :

$$k' = EC_{25} \times R_{25}$$

Dans notre cas : k' = 20 à 25°C

2) Facteur de correction de la température : ft

Sur le terrain la température est variable selon les périodes de l'année.

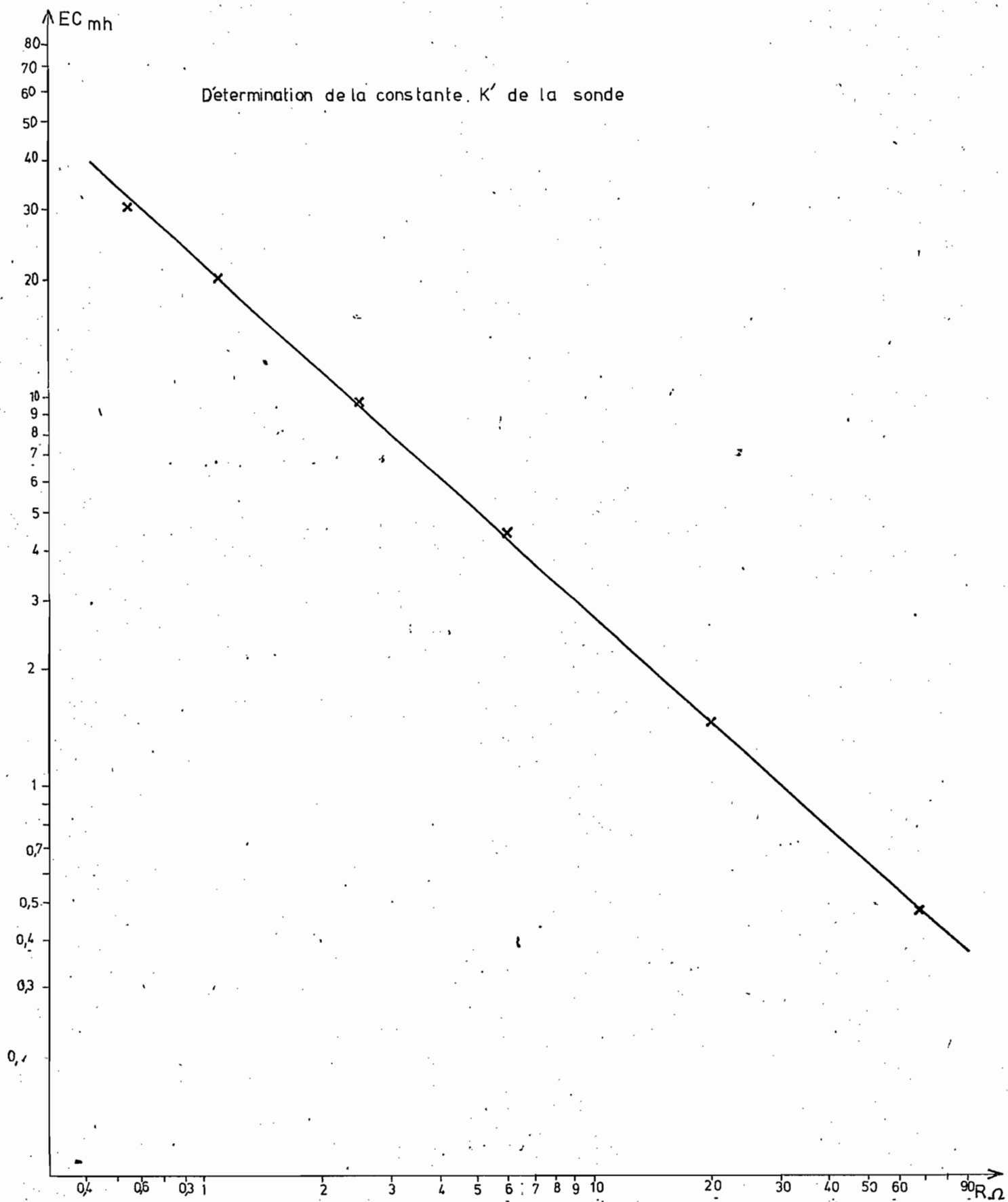
Comme la conductivité électrique de l'extrait saturé (ECe) est donnée à une température standard de 25°C, la conductivité électrique apparente (ECa) doit être corrigée à cette température.

Dans notre cas, et pour une période réduite de mesures d'ECa sur le terrain, la température a peu varié dans le sol à partir de 30 à 40 cm ; + = 16 à 18°C. (tableau n° 1).

Tableau n° 1 - Profils thermiques

Sites	Dates	Profondeur cm	Températures en °C	Sols
EL HABIBIA	24/1/1978	20	9	Sols salés argileux
		40	12	
		60	12	
		80	13	
		90	14	
		100	15	
EL HABIBIA	29/4/1978	15	18	Sols salés argileux
		35	17,7	
		55	16,8	
		75	17	
		95	17,5	
SOUKRA	24/3/1978	15	17	Sols salés sableux
		35	16	
		65	13,5	
		85	14	
		100	14	

fig: 2



Par contre la tranche supérieure (0-20 cm), subit une variation assez rapide de température, d'un jour à l'autre et même au cours de la même journée. (matin, midi ou soir) (Tableau n° 2).

Tableau n° 2 - Variations de températures à différentes heures de la journée et à différentes saisons dans la tranche de
0 - 10 cm

Dates et heures	Températures	Dates et heures	Températures
<u>16/1/1978</u>		<u>24/1/1978</u>	
9 h	5°C	9 h	9°C
11 h	7°C	11 h	10°C
12 h	8°C	12 h	11,5°C
16 h	8°C	14 h	12°C
<u>17/1/1978</u>		<u>25/1/1978</u>	
9 h	6,5°C	(12 h)	11°C
11 h	8°C	<u>24/3/1978</u>	
12 h	9°C	(12 h)	17°C
16 h	10°C	<u>11/4/1978</u>	
<u>18/1/1978</u>		(12 h)	18°C
9 h	9°C	<u>13/4/1978</u>	
11 h	10°C	(12 h)	15°C
12 h	10°C	<u>28/4/1978</u>	
<u>20/1/1978</u>		(12 h)	16°C
9 h	9°C		
11 h	11°C		
12 h	12°C		
14 h	12°C		

II - RESULTATS DES CAMPAGNES DE MESURES DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE APPARENTE (ECa) ET REPRESENTATION

A - COMPARAISON ENTRE LA METHODE QUADRIPOLE (WENNER) ET LA METHODE VERTICALE (SONDE)

Les deux méthodes ont été expérimentées sur trois sites différents :

- 1) Site SOUKRA
- 2) Site EL HABIBIA
- 3) Site MATEUR

1. - Site Soukra

Le site de SOUKRA est situé près d'une sebkha, il est constitué par un ensemble de cordons dunaires fixés par la végétation.

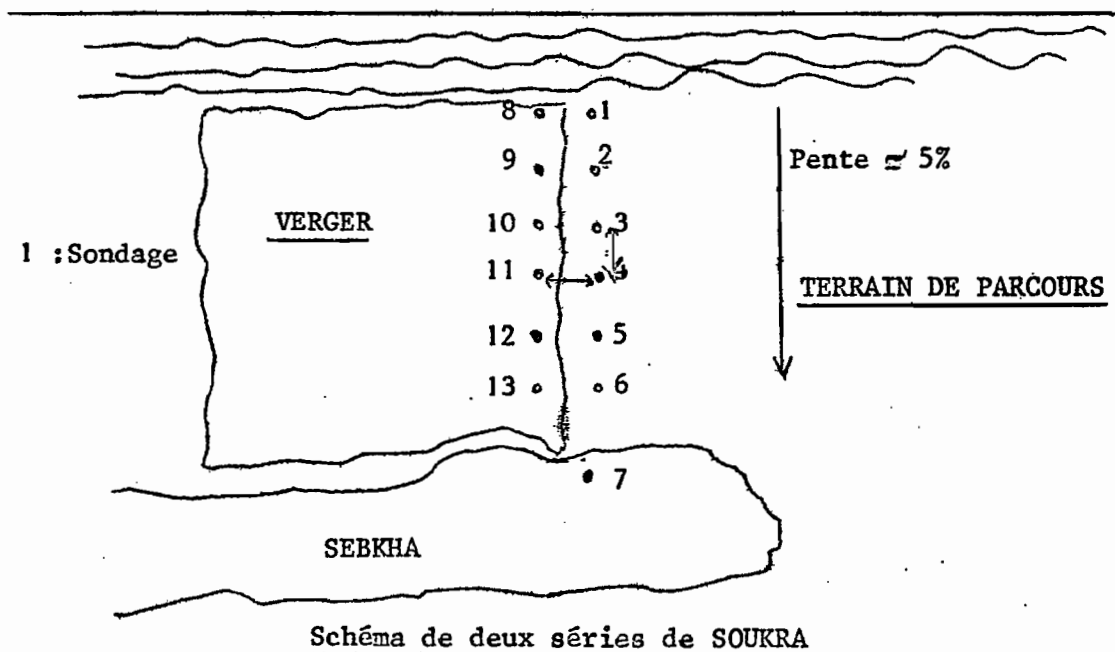
Les sols sont sableux (argile + limons < 5 %), ils doivent leur salure à la remontée de la nappe, trop chargée ($\approx 9,5$ g/l) essentiellement par les chlorures et les sulfates. (Tableau n° 3).

Tableau n° 3 - Analyse d'eau de nappe (SOUKRA)

Somme d'ions dosés mg/l	Conductivité mmhos/cm	pH	Cations (mg/l)				Anions mg/l			
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	CO ₃ H ⁻	CO ₃ ⁻⁻
9496	10,28	7,8	110	390	2576	66	1248	4100	976	000

Le niveau de la nappe est de 20 à 60 cm suivant la pente.

Deux séries de mesures ont été réalisées (13 points), l'une dans un terrain de parcours, l'autre dans un verger (voir schéma ci-dessous).



Les deux méthodes (Wenner et Sonde) conviennent à ce type de sol.

$$ECa_{\text{Wenner}} = 0,66 ECa_{\text{Sonde}} + 0,028$$

$$r = 0,9617 \dots \text{ (Figure n° 3)}$$

Mais les mesures avec la sonde demandent une certaine précaution, car la sonde a un diamètre voisin de 3 cm, pour l'enfoncer dans le sol, on prépare un trou de 2,8 cm de diamètre. Dans un sol sableux trop sec ou trop humide, le sable s'enfonce et gêne la réalisation d'un trou assez profond. Les deux méthodes sont fortement liées, la méthode Wenner est d'une pratique assez aisée dans les sols sableux.

2. - Site d'EL HABIBIA

C'est une parcelle du périmètre irrigué de la Medjerdah, laissée depuis près de 12 ans sans irrigation et sans culture, du fait de son drainage défectueux dans un sol peu perméable.

La nappe est à 60 cm, le sol est argileux, les efflorescences de sels sont visibles en surface, par endroit, dans des microdépressions, où l'eau chargée de sels stagne pendant la période des pluies.

Cette année la parcelle a été cultivée en orge ce qui nous a permis d'effectuer trois campagnes de mesures échelonnées dans le temps suivant les stades végétatifs.

✱ La première campagne a commencé pendant les premières pluies et le semis (40 points espacés de 20 m : 40 Wenner et 40 à la sonde)

✱ La deuxième campagne était après les pluies d'hiver et le stade de montaison (40 à la sonde et 20 Wenner).

✱ La troisième campagne et la dernière a été choisie en pleine période végétative et à la maturité de l'orge (80 points à la sonde).

Dans le site, nous avons une faible relation entre l'ECa de la sonde électrique et la méthode Wenner, sauf pour la tranche supérieure de 0-15 cm (figure n° 4) nous avons :

$$ECa_{\text{Wenner}} = 0,57 ECa_{\text{sonde}} - 0,10$$

$$r = 0,93$$

fig: 3

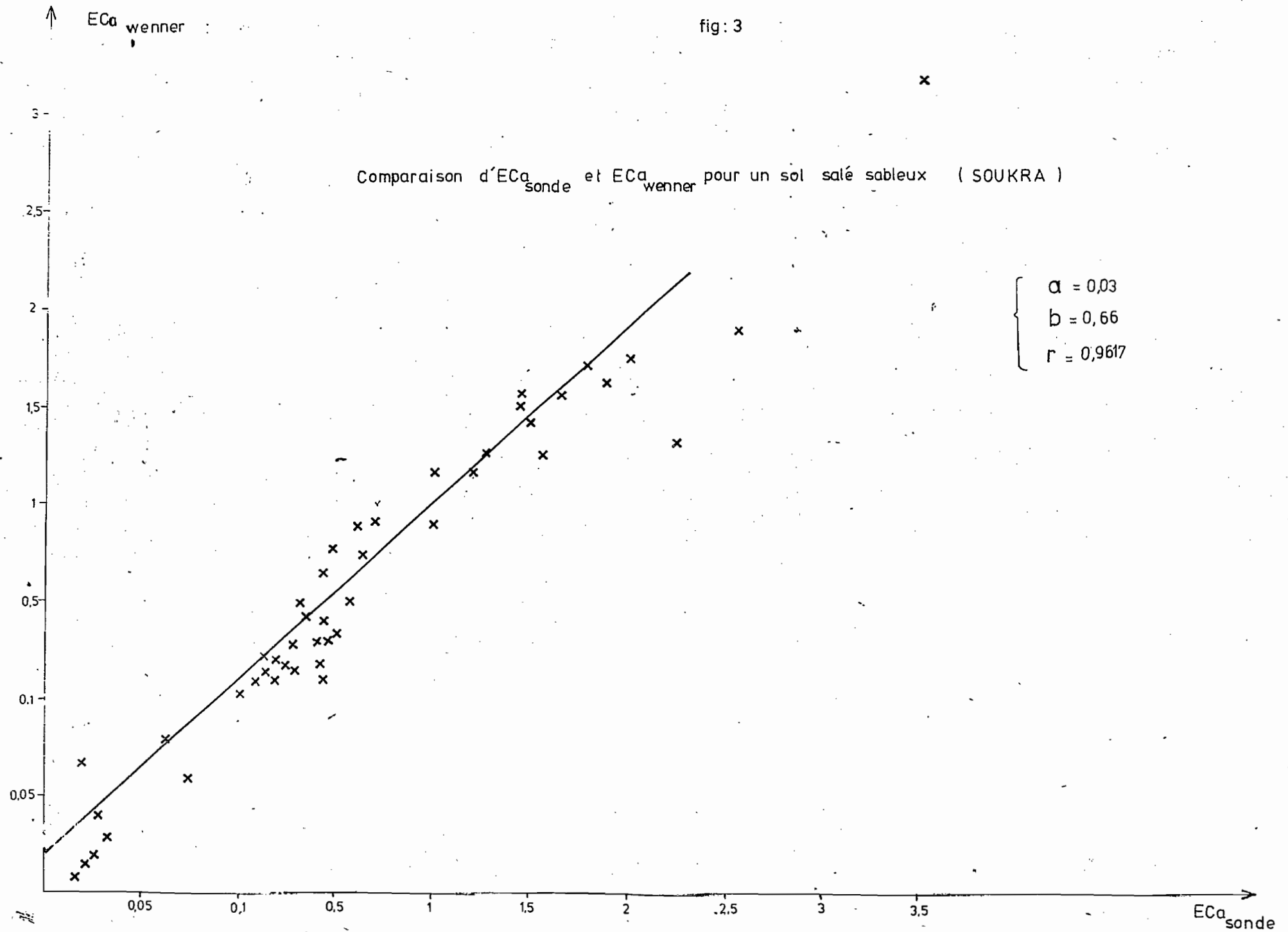
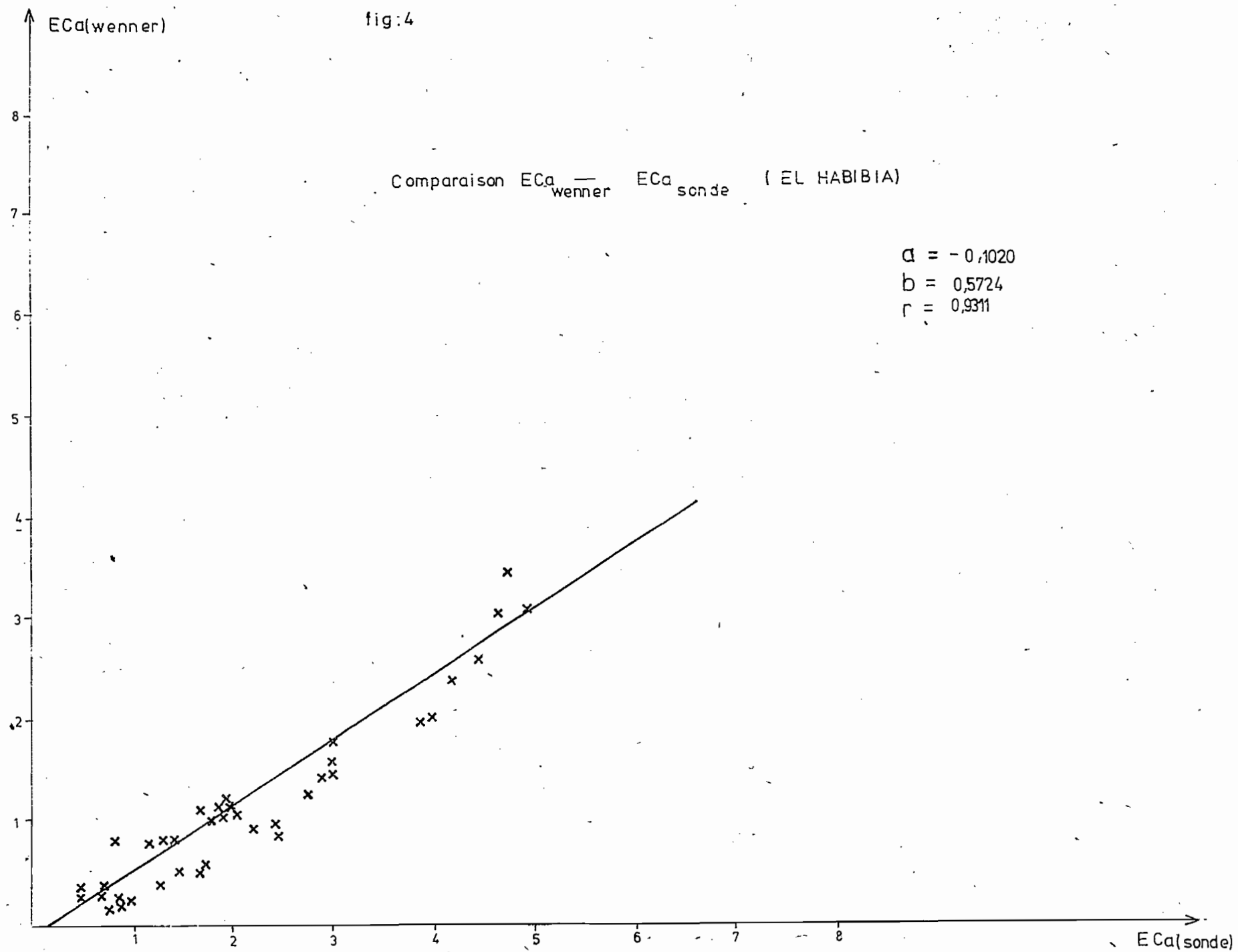


fig:4



Mais avec la sonde nous avons des valeurs d'E_{Ca} par tranche de sol (5 en 5 cm ou 10 en 10 cm ...), et avec la méthode Wenner nous avons l'E_{Ca} cumulée.

Pour passer de l'E_{Ca} cumulée à l'E_{Ca} par tranche de sol, nous supposons que le sol est un ensemble de résistances parallèles, par exemple :

E_{Ca₃₀} = conductivité électrique apparente de la tranche de 0 à 30 cm

E_{Ca₂₀} = celle de 0 à 20 cm

et nous calculons l'E_{Ca₂₀₋₃₀} de la tranche entre 20 et 30 cm par :

$$E_{Ca_{20-30}} \times 10 = E_{Ca_{30}} \times 30 - E_{Ca_{20}} \times 20$$

$$E_{Ca_{20-30}} = \frac{E_{Ca_{30}} \times 30 - E_{Ca_{20}} \times 20}{10}$$

(10, 20 et 30, les épaisseurs des tranches) ou d'une façon générale :

$$E_{Ca_{n-(n-a)}} = \frac{E_{Ca_n} \times n - E_{Ca_{n-a}} \times (n-a)}{a}$$

Suivant cette formule nous pouvons calculer l'E_{Ca} pour chaque tranche de sol de 10 ou de 20 cm ... Pour certains sondages, nous avons obtenu des valeurs négatives, ce qui est anormal. Cette anomalie peut être due à deux variables dont l'E_{Ca} dépend :

- a₁ - Profondeur d'investigation et volume du sol prospecté
- a₂ - Facteur géométrique k.

a₁ - Profondeur d'investigation et volume du sol prospecté

Dans le dispositif Wenner, la profondeur d'investigation est théoriquement proche de $AB/3 = a$ (AB = écartement des électrodes extérieures) (Réf. RHOADES - INGRALSON - 1971). L'injection du courant par les électrodes A et B crée des lignes équipotentiellles de champ, qui sont en première approximation des cercles centrés en A et B, et, étant donné la forme généralement ellipsoïdale du champ créé, l'écartement progressif des électrodes d'injection, permet de prospecter des couches de plus en plus profondes.

Le volume prospecté est estimé à πa^3 . Pour les couches de surface, ce volume est réduit, puisque "a" est petit, au fur et à mesure que "a" augmente, le volume augmente fortement en fonction de la profondeur (schéma n° 1).

Mais cette profondeur, qui est arbitrairement fixée à "a", elle intervient dans le calcul d'ECa de tranche en tranche. Si la profondeur d'investigation est mal connue il ne faut pas chercher la précision sur ECa pour une tranche de 10 ou de 20 cm.

Néanmoins, dans un terrain homogène, comme nous avons vu dans le site de SOUKRA, la variation du volume en fonction de la profondeur n'a pas affecté les mesures d'ECa ; alors que dans le site d'EL HABIBIA, quand le volume augmente, on aura plus de chance d'avoir un volume de plus en plus hétérogène (accumulation préférentielle de sels, nappe perchée, ...) et par suite la résistivité du terrain dépend des variations horizontales et verticales.

Il suffit, d'une forte concentration de sels par endroit, en surface ou à une certaine profondeur, l'ECa sera grande pour ce point de mesure par rapport à la mesure précédente et celle d'après. En multipliant cette valeur particulière d'ECa par une profondeur imprécise, le calcul d'ECa par tranche sera erroné.

La variation du volume prospecté dans un terrain hétérogène, peut être une cause d'erreur pour la méthode Wenner. La sonde s'adapte mieux, par le fait qu'elle prospecte un volume réduit ($V = 5/6 \pi a^3$, $a = 2,6$ cm, $V \approx 90$ cm³) mais fixe. Les seules variations qui interviennent sont verticales.

Quand nous comparons les deux méthodes nous raisonnons sur les valeurs d'ECa, pour chaque méthode pour un point donné de sondage, alors qu'en réalité, les volumes prospectés sont différents.

a₂ - Facteur géométrique k

Le facteur géométrique k dépend aussi de l'écartement des électrodes ($AB/3 = a$) $k = 2 \pi a$ (dispositif Wenner).

Cette formule est utilisée dans les sondages géophysiques. Une erreur de 2 à 3 m sur "a", pour une profondeur de 200 à 300 m est négligeable, alors que pour notre système miniaturisé, où, nous cherchons la salure et la précision pour une tranche de 20 cm, une erreur d'emplacement, ou d'alignement,

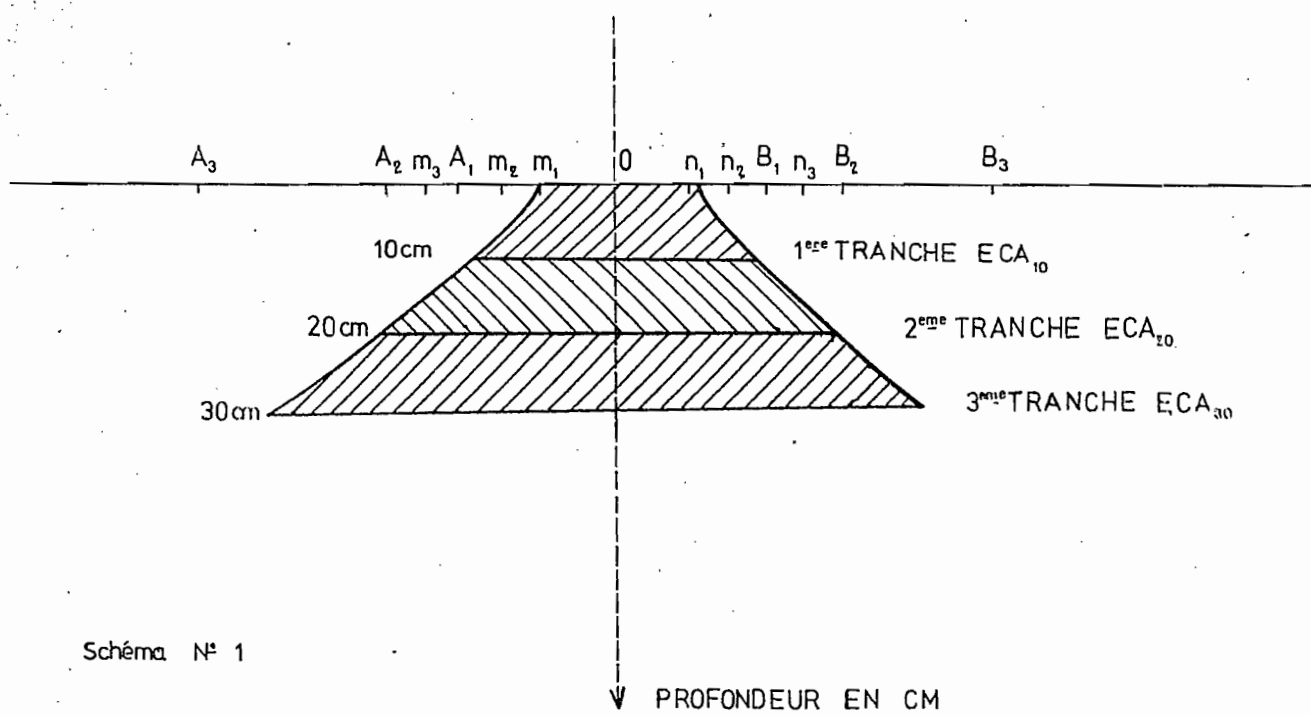


Schéma N° 1

Profondeur d'investigation

de quelques centimètres sur "a" modifie la valeur de la résistivité et par là la conductivité électrique apparente.

Dans le calcul du facteur géométrique k, nous avons tenu compte de la profondeur d'enfoncement des piquets dans le sol; k devient :

$$k = \frac{4 \pi a}{1 + 2a \left(\frac{1}{\sqrt{a^2 + 4C^2}} - \frac{1}{\sqrt{4a^2 - 4C^2}} \right)}$$

C = Profondeur d'enfoncement des piquets en cm

3. - Site de MATEUR (Sols alcalins)

C'est un sol alcalin de Garaa, en surface on a une structure feuilletée avec pseudo-sable, et des efflorescences salines, qui sont " dues à la présence d'une nappe phréatique très salée devant remonter en hiver aux environs de 50 cm" (Réf. Etude Pédologique de la Plaine de Mateur par A. MORI - ORSTOM 1962) (Profil n° 277).

Le sol a un pourcentage d'eau voisin de 20 %, deux sondages électriques ont été échantillonnés. L'un dans la partie de la Garaa à végétation adaptée aux sels (2B) (Végét. : *Arthrocnemum glaberrimum*). L'autre dans une partie sans végétation (3B). La méthode Wenner et la méthode verticale s'adaptent bien à ce type de sol.

B - REPRESENTATION DES DONNEES DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE APPARENTE (ECa)

A la fin des campagnes des mesures, nous nous sommes trouvés avec d'énormes données d'ECa. Près de 180 sondages à la sonde, soit environ 4000 données d'ECa de 5 en 5 cm, et 75 sondages Wenner, près de 1500 valeurs d'ECa de 10 en 10 cm.

C'est alors que le problème d'exploitation de ces données s'est posé. A cette fin, nous avons essayé de représenter l'ECa en fonction de la profondeur ou une représentation horizontale par des courbes d'isohyales par tranche de sol, de 10 en 10 cm.

1. - Représentation verticale

Cette représentation a l'intérêt de voir la variation d'ECa de 5 en 5 cm en fonction de la profondeur. Elle permet de mettre en évidence d'autres caractères qui sont liés à la salure, comme le niveau de battement de la nappe, les discontinuités lithologiques. Elle permet aussi de comparer les profils entre eux des différents sols salés à alcalis, ou la variation d'ECa dans le temps.

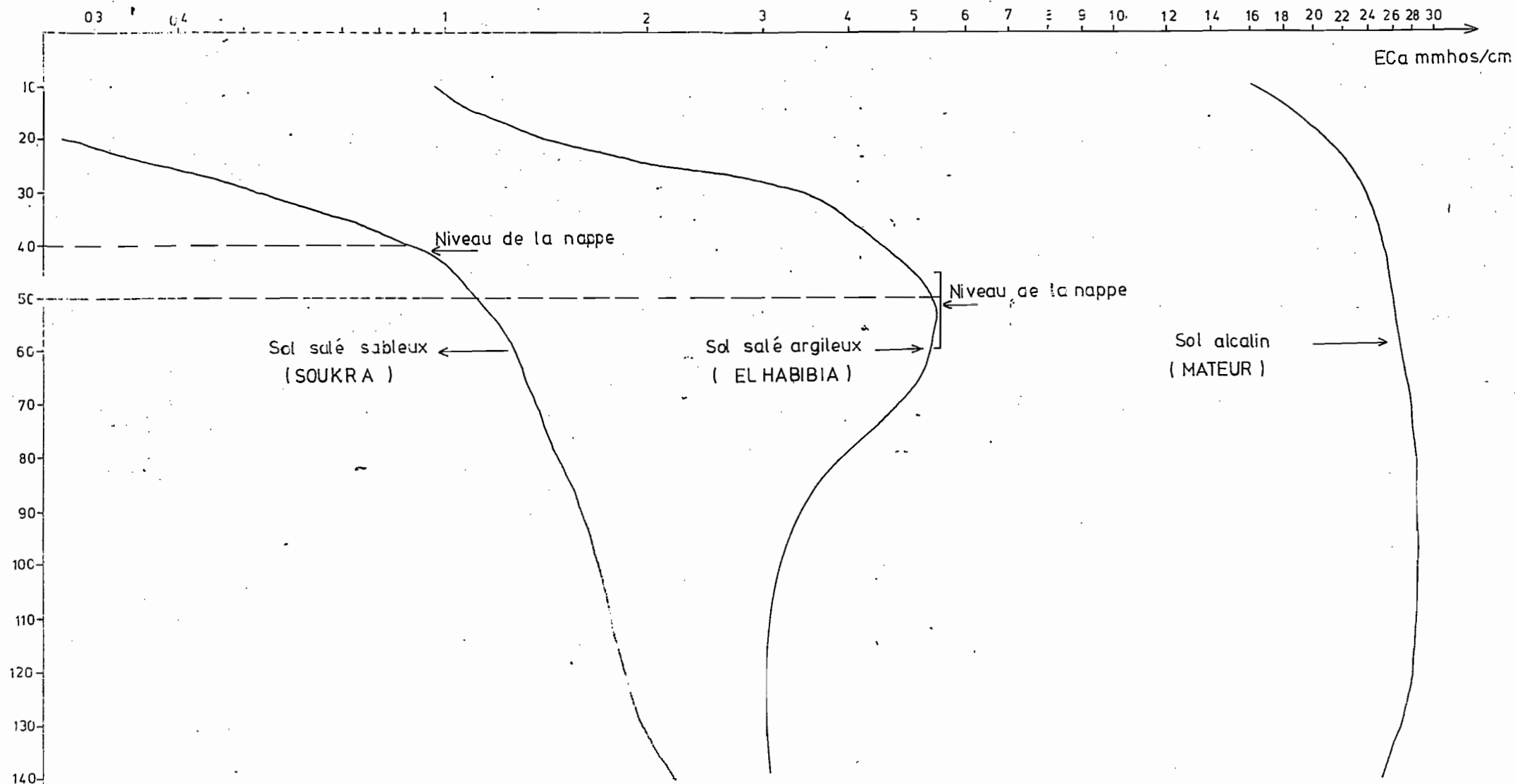
a, - Profil salin des différents sols salés = alcalis (Figure n° 6)

D'après la figure 6, le profil salin est caractéristique pour chaque type de sol.

Dans un sol salé sableux, l'ECa est faible en surface, jusqu'au niveau de la nappe (40-50 cm) où la salure augmente brutalement, et se stabilise ou augmente légèrement en fonction de la profondeur.

Dans le sol salé très argileux, l'ECa est faible dans les 20 premiers centimètres, puis elle augmente brusquement pour marquer un maximum au niveau de battement de la nappe ; puis diminue et se stabilise à partir de 80 à 100 cm. La courbe peut être divisée en trois tranches, la première (\approx 0-30 cm) a une zone où l'action des eaux des pluies est dominante, les sels sont entraînés en profondeur, dont une grande partie reste au niveau de la nappe, pendant la saison sèche, pour une forte évaporation, la nappe descend, les sels se déposent entre 30 et 70 cm ce qui correspond à la 2ème partie de la courbe qui présente un maximum de salure. La troisième tranche de courbe à partir de 80 cm, où la concentration en sels est à peu près constante, le sol est durant toute l'année à la capacité de rétention au moins.

fig: 6



Profondeur en cm

Représentation Verticale d'ECa (Profil salin pour chaque type de sol)

Dans le sol alcalin, nous avons l'ECa qui est à peu près constante dans tout le profil.

En résumé, nous pouvons dire que dans un sol alcalin, la concentration des sels est constante dans tout le profil, même en surface du fait de leur structure dégradée, sol presque imperméable, les eaux de pluie stagnent, elles s'infiltrant peu pour entraîner les sels en profondeur.

Le sol salé argileux, s'individualise par un horizon de concentration de sels, résultant de deux actions combinées, un lessivage des couches de surface pendant les pluies et une remontée des sels pour les phénomènes capillaires pendant la saison sèche. Cependant, dans un sol salé sableux, les phénomènes capillaires sont faibles, et il suffit d'une faible quantité de pluies pour entraîner les sels en profondeur, et la salure sera liée au niveau de la nappe, il n'y a pas un niveau de concentration de sels comme dans le sol argileux.

a₂. - Profil d'ECa et nature de matériau (Figure n° 7)

Le graphique montre un profil salin caractéristique des sols salés argileux comme il était décrit avant, sauf au niveau de 80 à 100 cm nous avons un niveau sableux (Tableau n° 4).

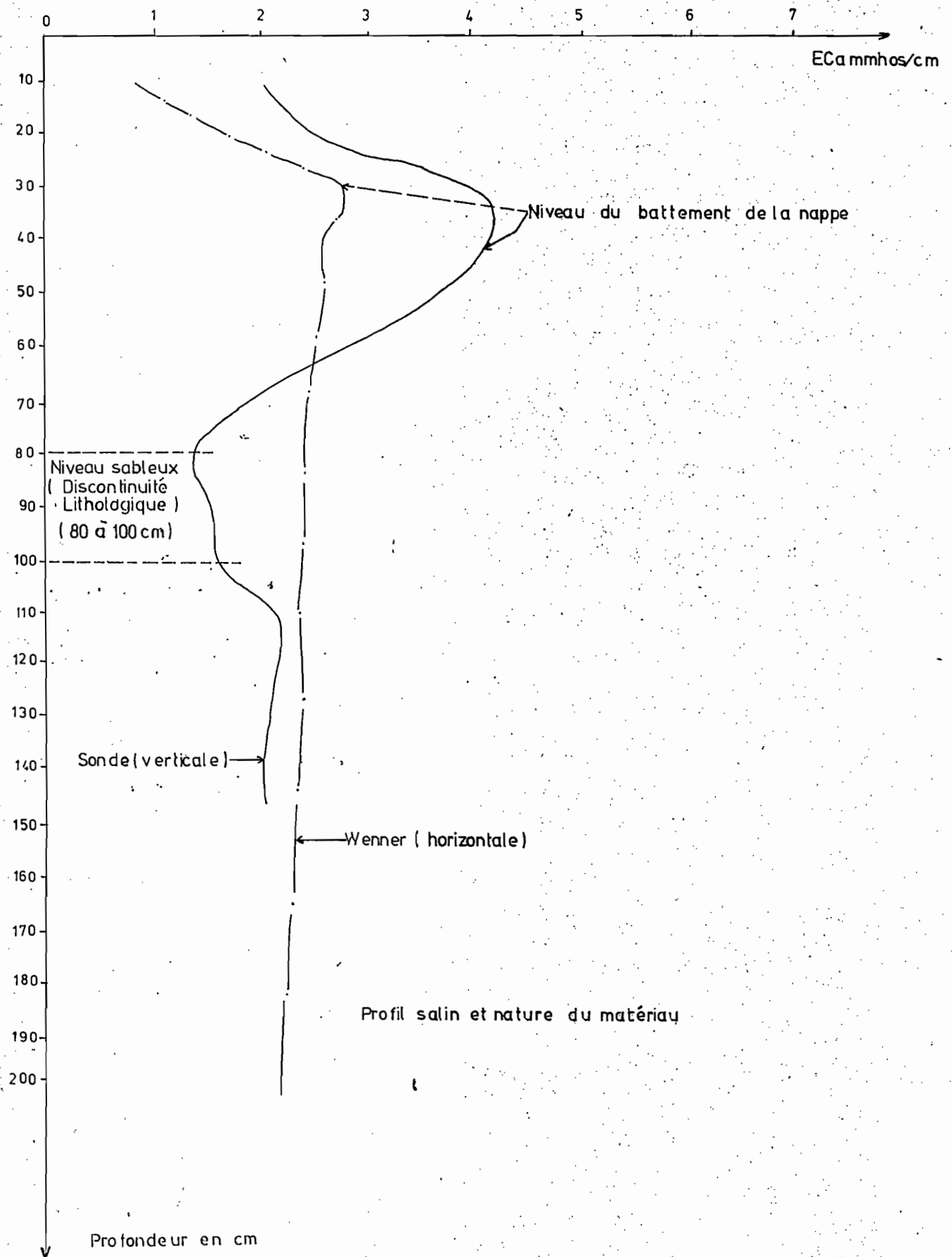
Tableau n° 4 - Granulométrie du profil n° 11

Profondeur cm	Argile %	LF %	LG %	SF %	SG %
0 - 20	42,5	21	11,5	17,5	5
20 - 40	50	22,5	10	13	2
40 - 60	46,5	210,5	9	19,5	1,5
60 - 80	42	16	8,5	22,5	1
80 - 100	25,5	8	6	54	3

La sonde marque bien le niveau sableux, puisque la salure est liée à la nature du matériau, alors que la méthode Wenner n'indique que la zone de forte concentration en sels, ce qui fait l'originalité de la sonde, elle a l'avantage de mesurer la salure et les paramètres qui y sont liés.

D'après, aussi le graphique nous constatons que la zone de battement de la nappe est à 30 cm, et le niveau sableux est à 80-100 cm,

fig: 7



nous constatons que ce niveau à une conductivité électrique inférieure par rapport à la partie en-dessous et en-dessus du sol, ce qui nous a amené à prélever l'eau de la nappe à ce niveau et à le comparer à l'eau de la nappe de l'autre profil distant de 20 m pour voir la différence (voir tableau n° 5).

Tableau n° 5 - Analyse d'eau du profil 11 et 12 distant de 20 m

Profil n°	Conduct. mmhos/cm	Sommes d'ions dosés en mg/l	Cations mg/l				Anions mg/l			
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	CO ₃ H ⁻	CO ₃ ⁻⁻
11	6,33	4194	174	208	1185	3	672	1882	72	0
12	10,89	8891	560	336	2220	11	2604	3089	72	0

Donc d'après ce tableau l'eau de la nappe du profil qui présente un niveau sableux est moins chargée que l'eau de la nappe d'un profil argileux homogène. La sonde donne une idée assez précise du profil salin dans le sol.

a₃. - Profil d'ECa et niveau de battement de la nappe

Comme le niveau de battement de la nappe correspond souvent à la zone de forte concentration en sels (sauf pour les microdépressions où les sels s'accumulent dès la surface), la courbe de l'ECa en fonction de la profondeur montre un maximum à ce niveau (voir tableau n° 6).

Tableau n° 6 - Niveau de battement de la nappe et le maximum d'ECa en fonction de la profondeur

N° profil	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Niveau de la nappe en cm	25	30	35	35	50	60	65	70	70	60	45	30	35	30	25	25	30
Maximum ECa=f(profondeur) cm	20	25	35	35	40	40	50	55	50	45	35	25	30	25	20	20	30
N° profil	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
Niveau de la nappe en cm	50	50	45	50	40	40	60	45	35	35	30	35	30				
Maximum ECa=f(profcndeur) cm	45	50	50	45	35	30	55	30	35	40	30	40	35				

* le niveau de la nappe a été mesuré après les pluies d'hiver

D'après ce tableau, nous constatons que le maximum de la courbe ECa en fonction de la profondeur correspond grosso-modo au niveau de battement de la nappe; et par conséquent grâce à la sonde nous pouvons contrôler le déplacement du front de la salure si nous désirons traiter un sol salé.

a₄. - Comparaison des profils salins entre eux

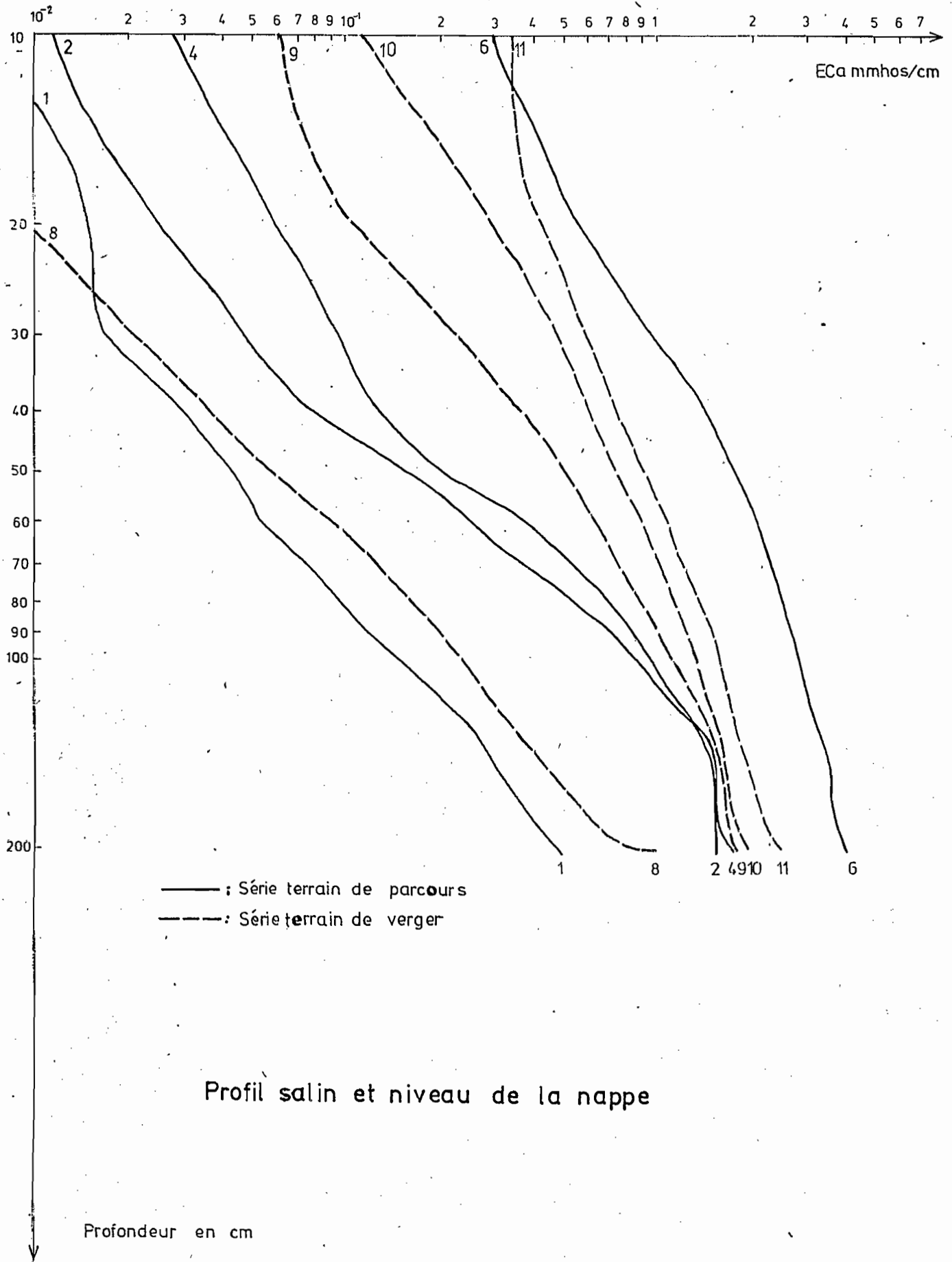
Dans d'autres cas, la représentation verticale nous permet de comparer les profils entre eux, quand ces derniers se caractérisent par une différenciation nette dans l'espace par exemple dans les deux séries de SOUKRA (figure n° 8), l'évolution de la salure est bien nette en fonction du niveau de la nappe qui est en relation avec la pente.

Les profils n° 1, 2, 4 et 6 de la série du terrain de parcours, et 8, 9, 10 et 11 de la série du verger, montrent d'une part, une faible salure quand le niveau de la nappe est assez profond, car même une faible quantité de pluies peut lessiver les sels et les entraîner en profondeur, du fait que la capacité au champ de ces sols est faible ; (rappelons que les mesures d'ECa ont été faites pendant la période où le sol était à la capacité au champ à partir de 20 cm).

Quand le niveau de la nappe est proche de la surface, le profil salin est bien individualisé des autres, la conductivité électrique apparente est forte dans tout le profil, elle est liée à la salure de la nappe.

D'autre part, nous constatons aussi que les deux séries sont bien différenciées l'une de l'autre bien que la distance qui les sépare soit de 20 m. Le sol du verger a une salure relativement plus élevée que le sol du terrain de parcours, peut être ce phénomène est accordé à l'effet culture, il est dû au mécanisme de forte activité racinaire des arbres, qui puisent dans la solution du sol les éléments nécessaires à leur nutrition, et ils laissent les sels qui se concentrent au fur et à mesure que l'eau du sol sera utilisé par les racines. La solution du sol devient de plus en plus salée, surtout pendant la période sèche, jusqu'à une certaine valeur où les racines ne peuvent plus s'adapter.

fig:8



a₅. - Représentation verticale et lessivage des sels (figure n° 9)

La représentation verticale nous permet de contrôler le déplacement du front de salinité dans un profil, avec le temps. La figure n° 9 du profil salin 32, nous montre que la courbe d'ECa de la première couverture présente deux cassures : la première à 15 cm correspond à la partie supérieure du sol moins salée, et le commencement d'horizon d'accumulation du sel ; la deuxième cassure est à 35 cm avec une forte conductivité électrique apparente et puis une diminution régulière d'ECa avec la profondeur jusqu'à ce qu'elle devienne constante à partir de 80-90 cm (niveau de la nappe).

Dans la deuxième couverture les deux cassures se déplacent de 5 cm et 25 cm respectivement en profondeur par rapport à la première couverture.

Dans la troisième couverture, la première cassure se décale de 15 cm par rapport à la 1ère courbe, alors que la 2ème cassure reste à sa place par rapport à la deuxième couverture.

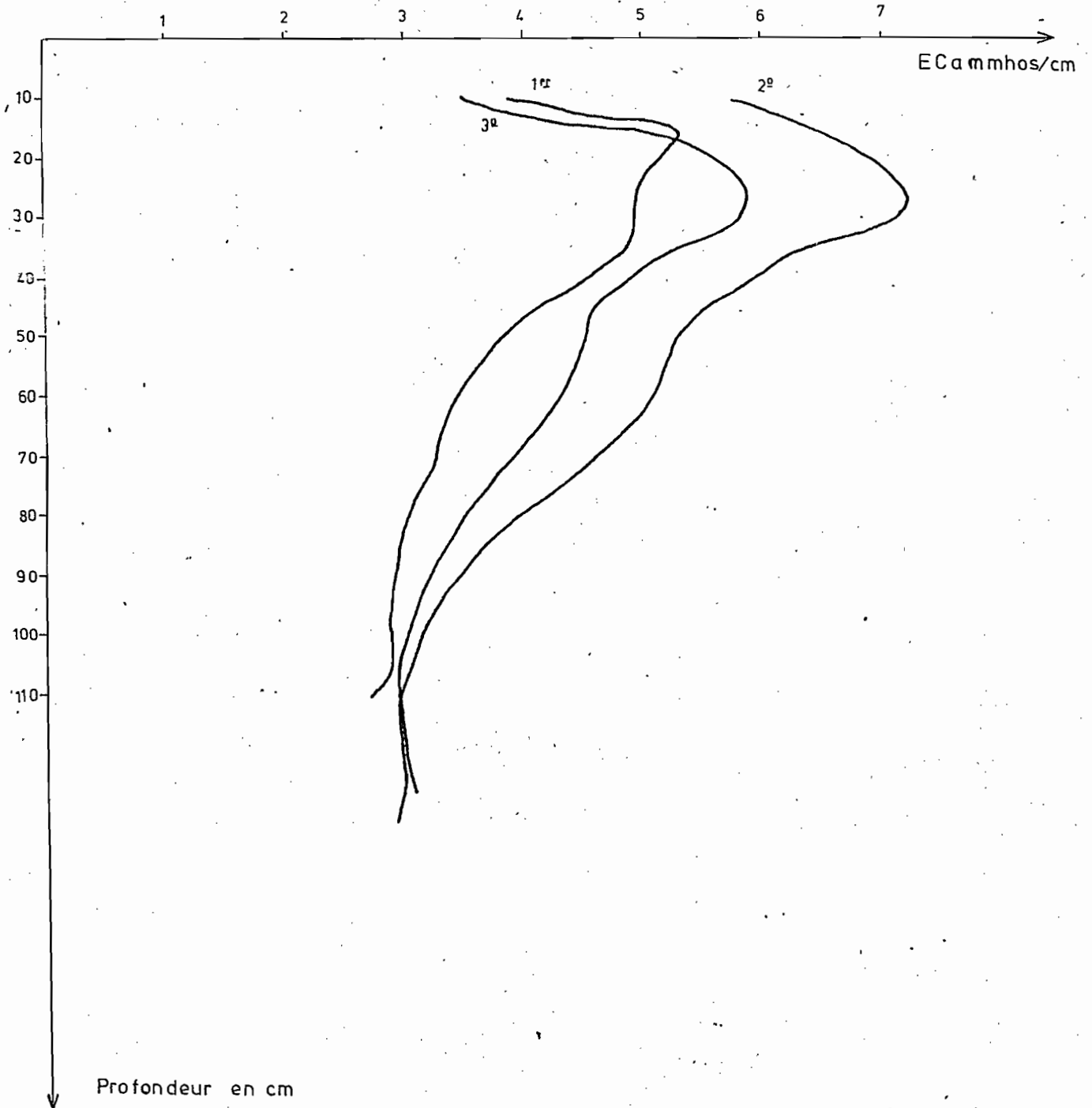
Ceci nous montre que pendant la période sèche nous avons un horizon d'accumulation de sels proche de la surface (1ère couverture), après les pluies d'hiver, nous avons la dissolution maximale des électrolytes avec un léger apport latéral et un lessivage en profondeur (2ème courbe) ce qui donne une conductivité électrique forte dans l'ensemble du profil avec un déplacement du front de salinité en profondeur.

Pendant le printemps la plupart des sels sont entraînés en profondeur, et le front de salinité reste à la même profondeur que la 2ème couverture.

Cette représentation verticale a l'avantage de donner une image réelle de la variation verticale d'ECa, elle permet de mettre en évidence tous les paramètres qui interviennent dans la variation de la conductivité électrique au terrain pour un point donné.

Mais quand on se trouve avec un grand nombre de profils salins la comparaison ou l'interprétation de ces profils un à un devient assez délicate. Ce qui nous a amené à adopter une autre représentation horizontale par des courbes d'isohyales, qui nous donnent une vision horizontale d'une tranche de sol d'épaisseur choisie et de suivre l'évolution d'ECa dans le temps et dans l'espace.

fig : 9



lessivage des sels au cours de l'année

2. - Représentation horizontale

La représentation horizontale a été appliquée pour les données d'ECa du site d'EL HABIBIA, car nous avons 160 profils de conductivité électrique apparente répartis en trois campagnes.

Une couverture avant les pluies, une deuxième pendant et après les pluies d'hiver, et une troisième couverture à la fin du printemps.

Nous examinerons la variation d'ECa dans le temps et dans l'espace de tranche en tranche de sol de 10 cm jusqu'à 140 cm de profondeur, pour voir la variation verticale et horizontale d'ECa au cours de l'année.

Nous disposons des données d'ECa de 5 en 5 cm de profondeur, mais nous représentons simplement les coupes de 10 en 10 cm pour limiter le nombre de coupes horizontales et rendre la comparaison des tranches de sol facile.

Au total nous avons 14 planches des courbes d'isohyales pour chaque campagne, quelques unes seront données à titre d'exemple.

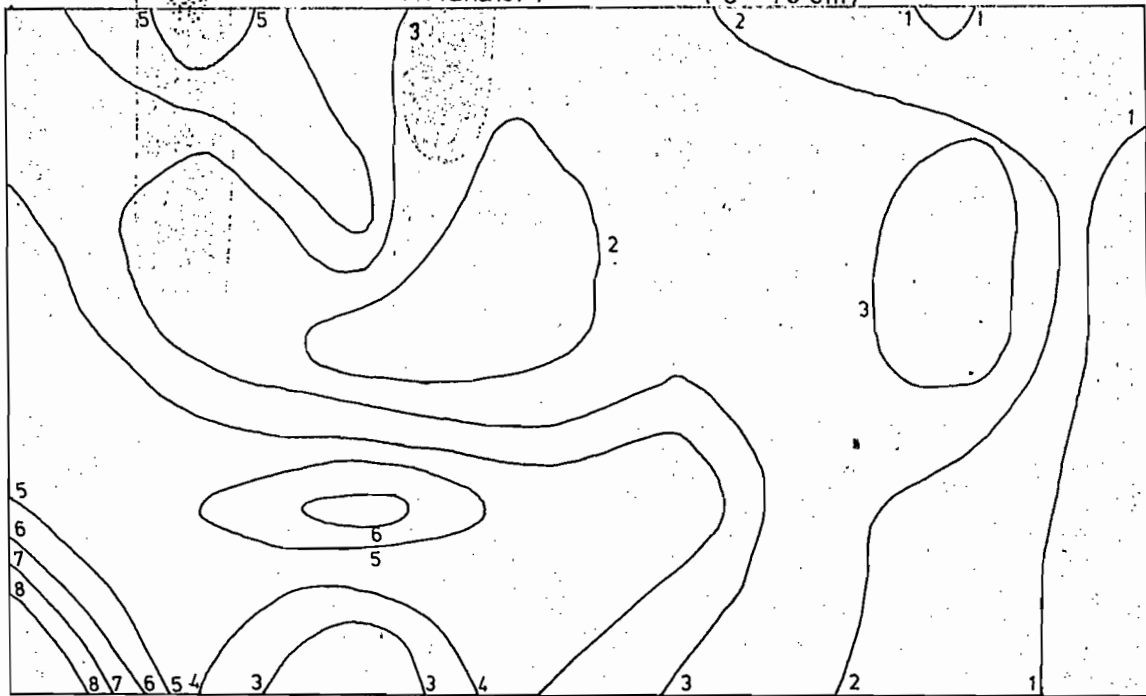
a₁. - Planche n° 1 (0-10 cm)

La conductivité électrique apparente reflète fidèlement l'aspect morphologique de surface du terrain, et plus particulièrement le micro-relief.

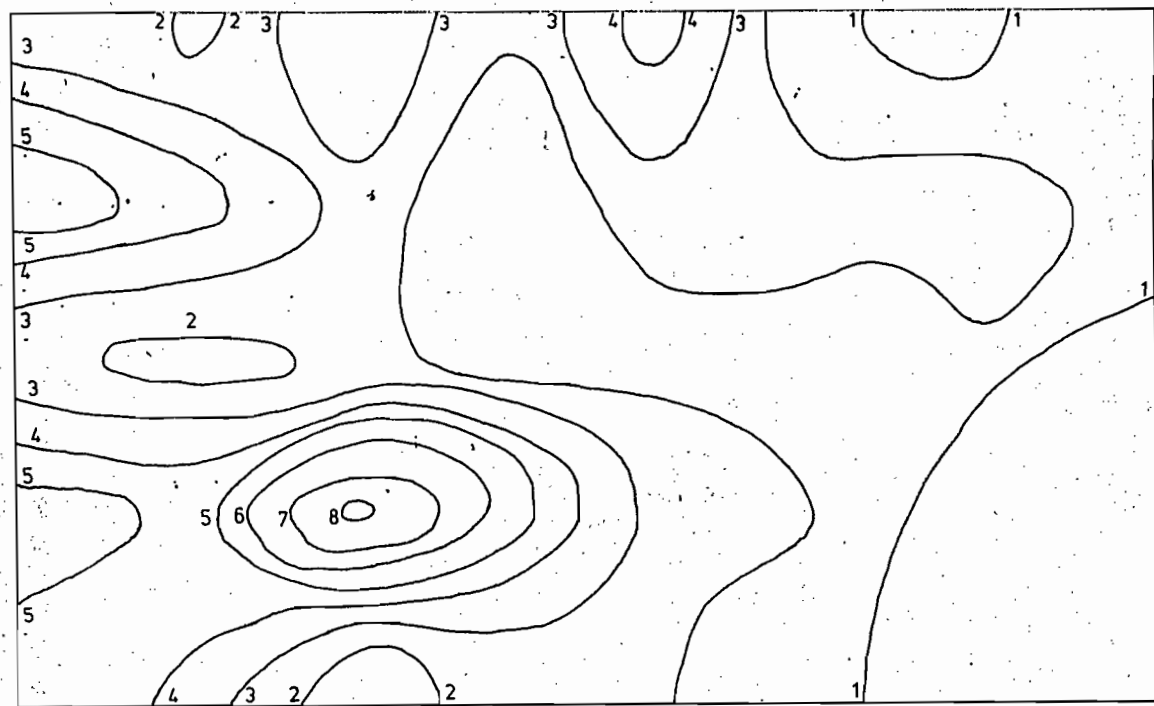
Ceci est plus évident dans le cas de la deuxième couverture après et pendant les pluies d'hiver, il y a une formation d'un noyau des courbes d'isohyales à forte conductivité électrique apparente. Ce noyau correspond à une zone de bas de pente et de microdépressions.

Si nous suivons l'évolution de la salure de la tranche de 0-10 cm pendant les trois campagnes, nous avons une conductivité électrique apparente initiale mesurée pendant la période sèche. Après les pluies et quand le sol était à saturation, une partie d'eau ruissellait malgré la faible pente et elle stagne dans les micro-dépressions à sol peu perméable. Cette eau de ruissellement est chargée en sels et elle favorise la formation des tâches à forte salure.

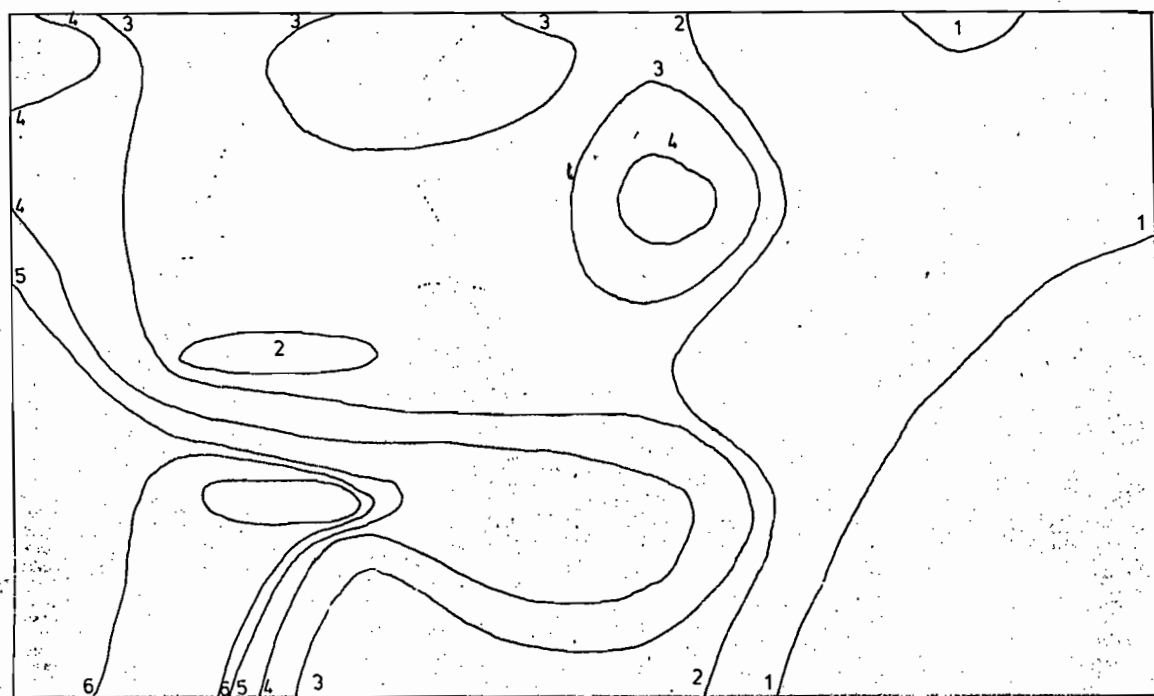
Après les pluies une partie de l'eau s'infiltre et entraîne les sels solubles en profondeur, et une autre partie s'évapore, en laissant des efflorescences de sels visibles en surface.



1^{re} couverture



2^e couverture



3^e couverture

20 cm

a₂. - Planche n° 2 (20-30 cm)

Dans cette planche nous commençons à avoir une différenciation des zones de différente salure.

Dans la deuxième couverture, la conductivité électrique apparente croît régulièrement de la droite vers la gauche de la planche, avec une certaine répartition de la salure.

Pendant les pluies, la conductivité électrique est forte par rapport à la première couverture et il semble qu'elle envahit le sol de la parcelle, ceci explique la dissolution des sels solubles dans l'eau des pluies, le sol est peu perméable, et la salure gagne le terrain à partir du bas de pente vers les zones voisines à pente très douce.

Nous pouvons subdiviser la parcelle en trois zones : une zone de faible conductivité, ($ECa < 2$ mmhos/cm) forme une tâche réduite ; une zone de forte conductivité ($ECa > 6$ mmhos/cm) occupe presque la moitié du terrain, et enfin une zone intermédiaire.

Après les pluies on a une répartition assez homogène de la conductivité électrique, on note la disparition des îlots de la zone intermédiaire.

a₃. - Planche n° 3 (30-40 cm)

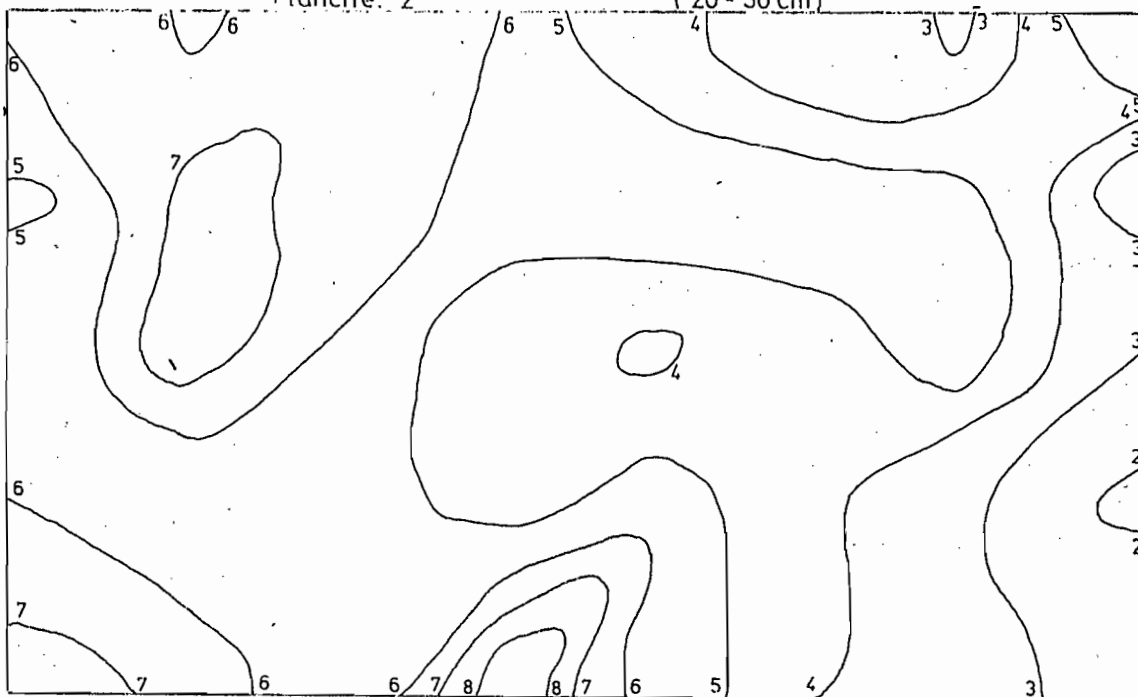
Cette planche est donnée comme exemple simplement pour voir l'évolution de la salure dans l'espace et en profondeur.

La délimitation des zones est la même que la tranche précédente (20-30 cm) mais on note que la zone de forte conductivité électrique apparente dans les microdépressions se retrécit peu à peu en profondeur. Par exemple la courbe d'isohyale d' ECa 7, dans la tranche 20-30, limite une grande tâche, en passant de 30 à 40 cm. Cette tâche est réduite presque à moitié. Ceci indique que les facteurs de surface qui favorisent l'accumulation préférentielle des sels par endroit commencent à devenir de plus en plus faible avec la profondeur et plus particulièrement le microrelief.

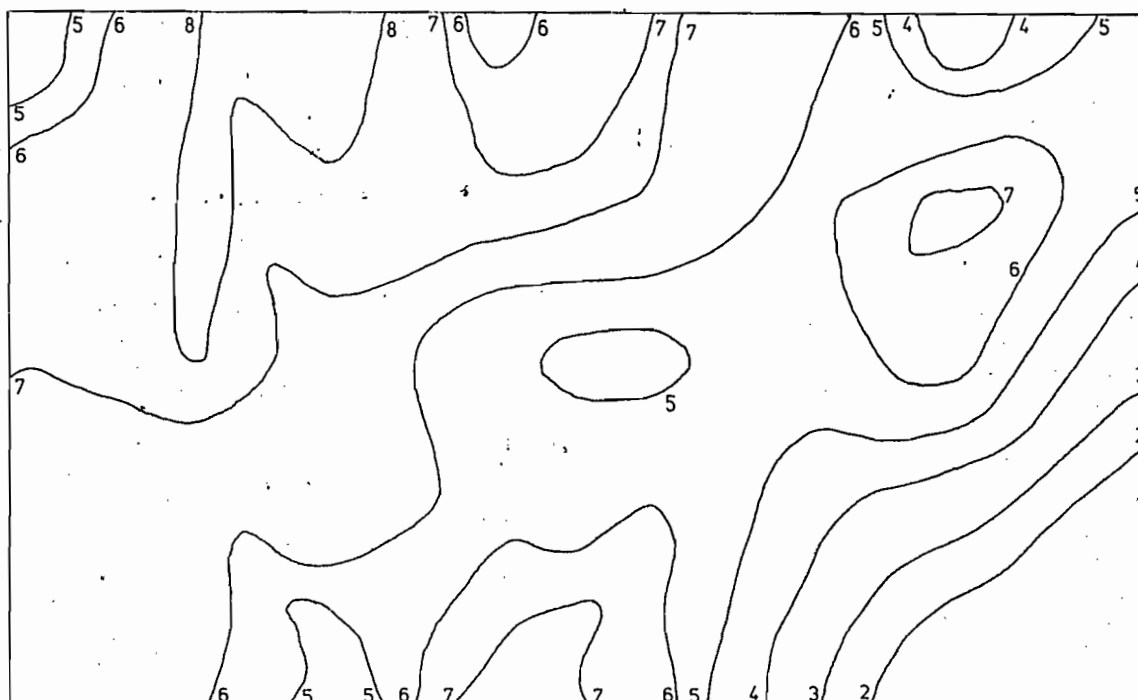
a₄. - Planche n° 4 (60-70 cm)

Ce niveau correspond pour la majorité des profils à la zone de battement ou au niveau de la nappe.

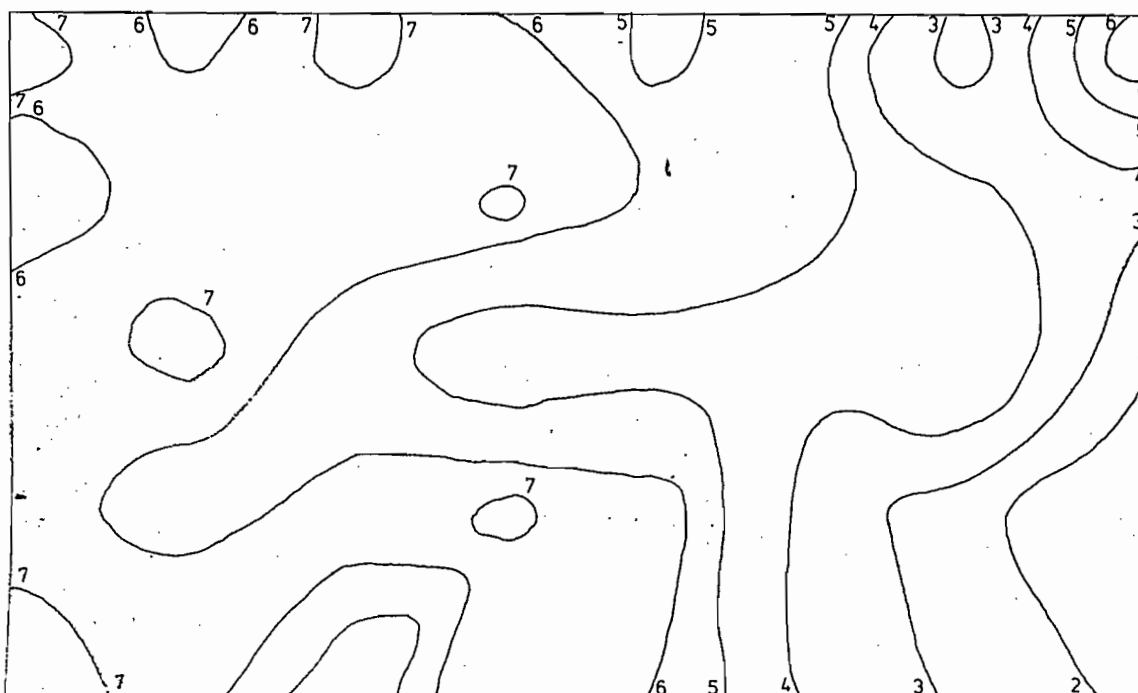
La conductivité électrique apparente est relativement faible par rapport aux tranches sus-jacentes.



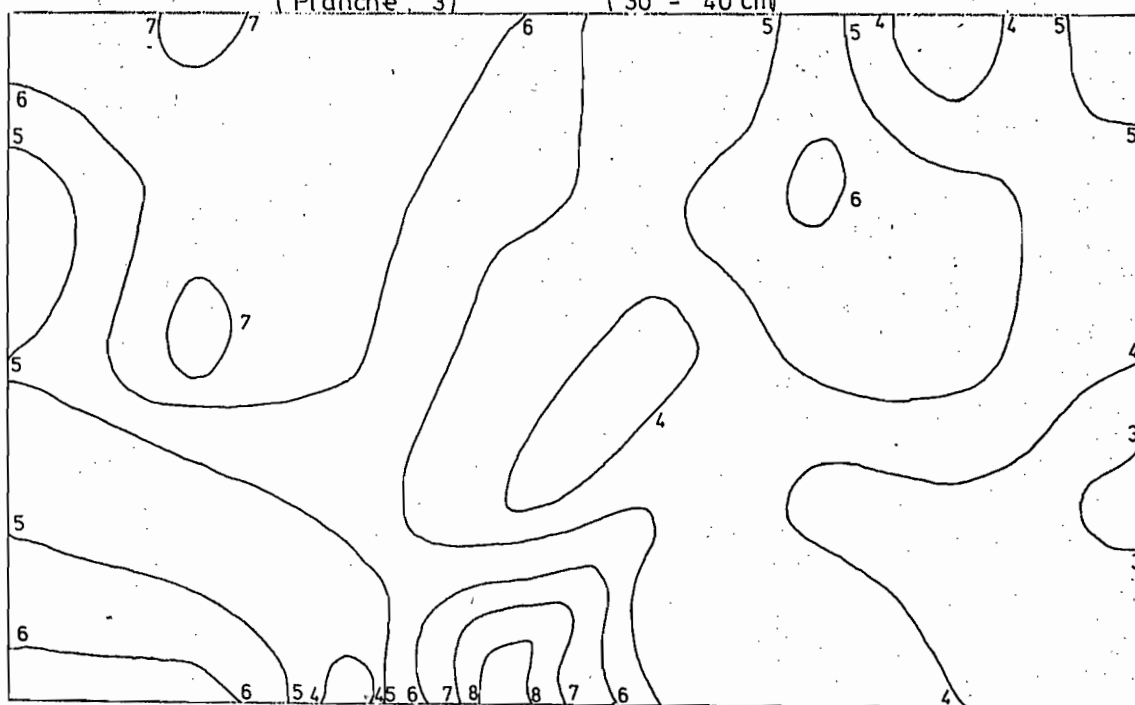
1^{ère} couverture



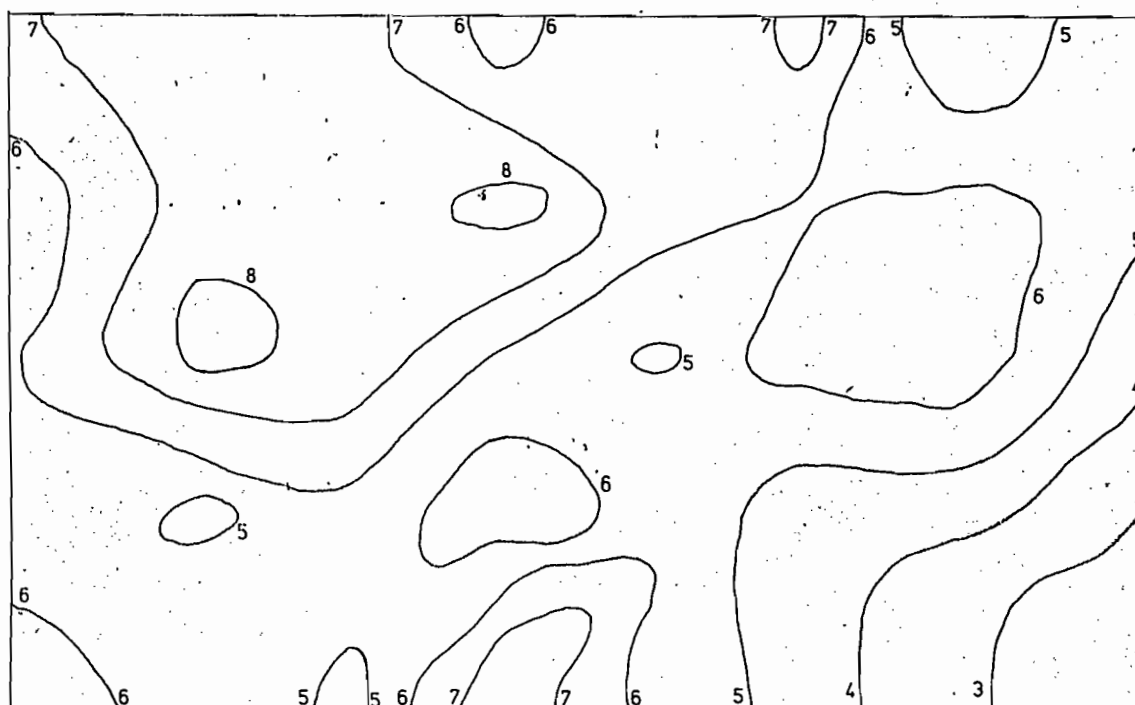
2^{ème} couverture



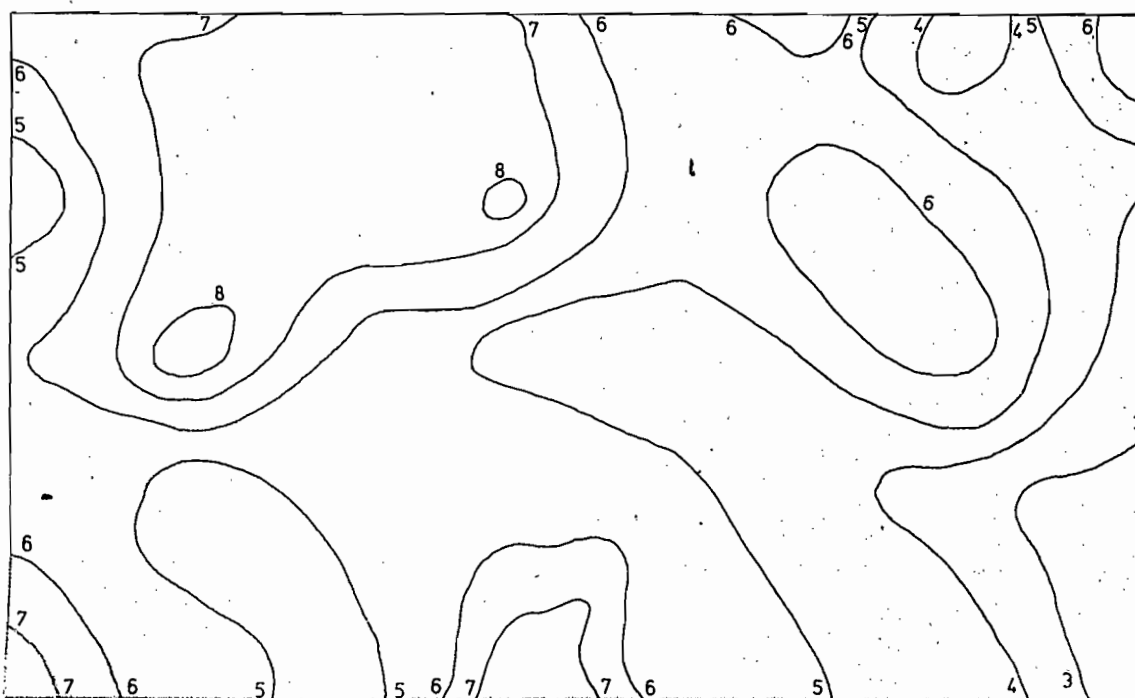
3^{ème} couverture



1^{ère} couverture



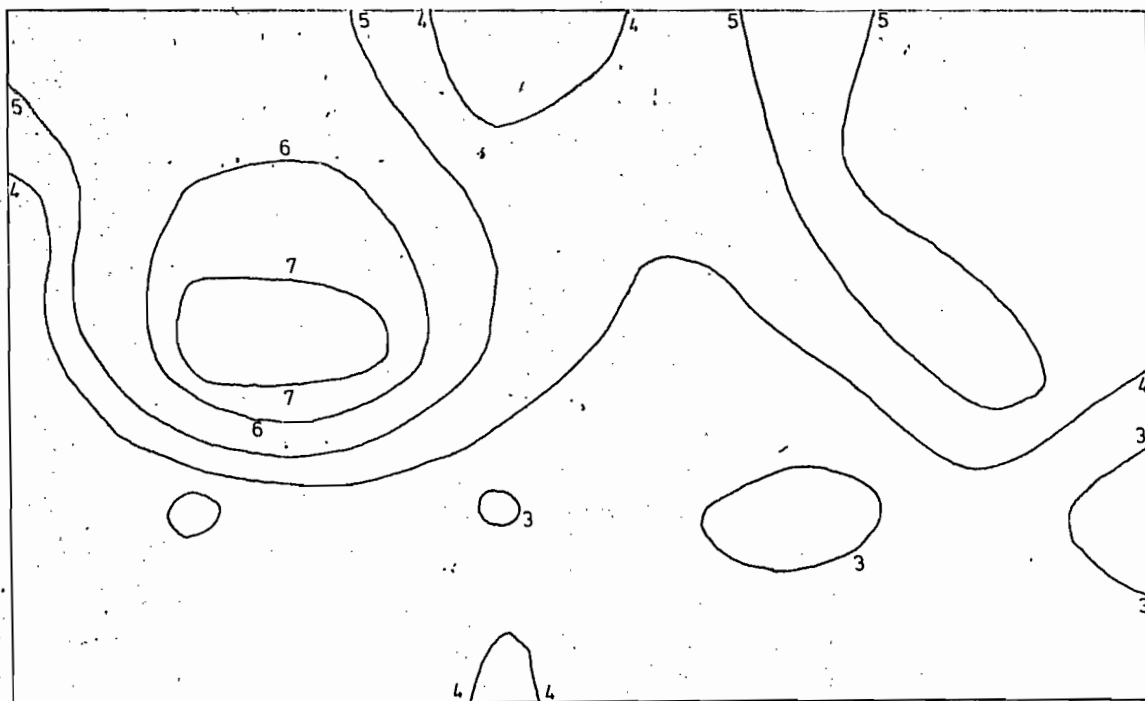
2^{ème} couverture



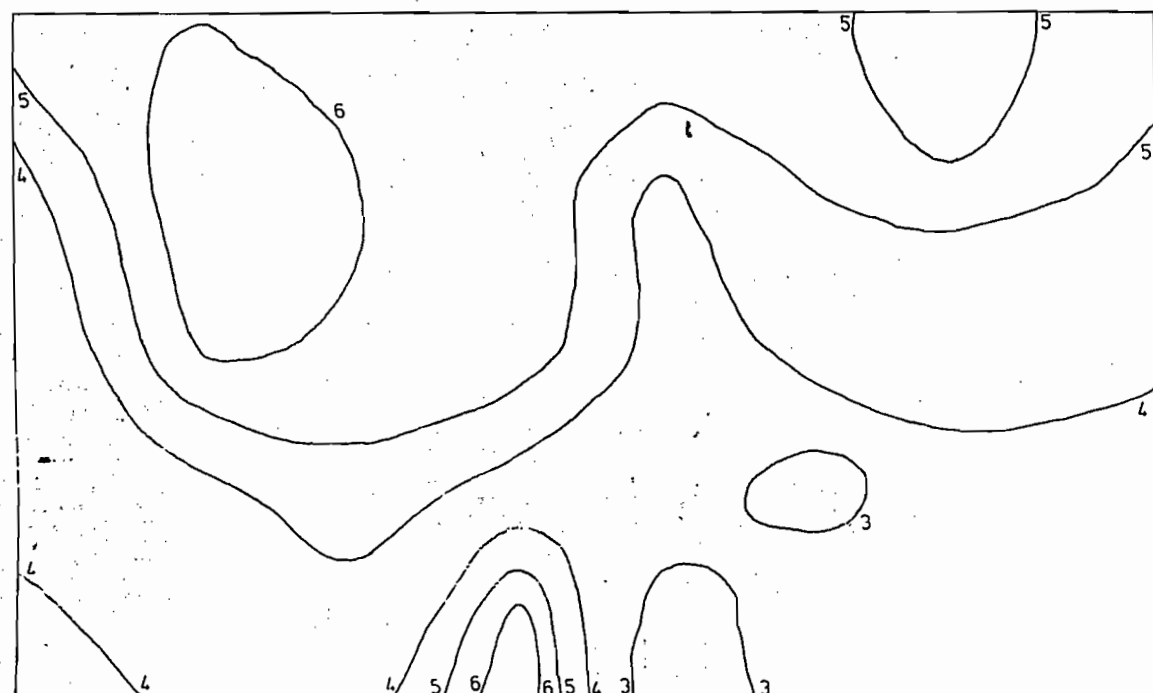
3^{ème} couverture



1^{ère} couverture



2^e couverture



3^e couverture

La parcelle est subdivisée en deux grands ensembles, un ensemble de faible conductivité et qui correspond à la zone de microdépressions et de bas de pente. Le deuxième ensemble a une conductivité électrique assez forte, il se situe en haut de pente.

Ces divisions sont essentiellement dues au niveau de la nappe. En bas de pente le niveau de la nappe est à 60 cm, alors qu'il est voisin de 100 cm en haut de pente.

Donc cette planche nous montre l'influence de la nappe sur la conductivité électrique.

a₅. - Planche n° 5 (90-100 cm)

Pour l'ensemble des profils, en général le niveau de la nappe est inférieur à 100 cm ; la conductivité électrique apparente est constante, elle est voisine de 3 mmhos/cm pour les trois campagnes de mesures.

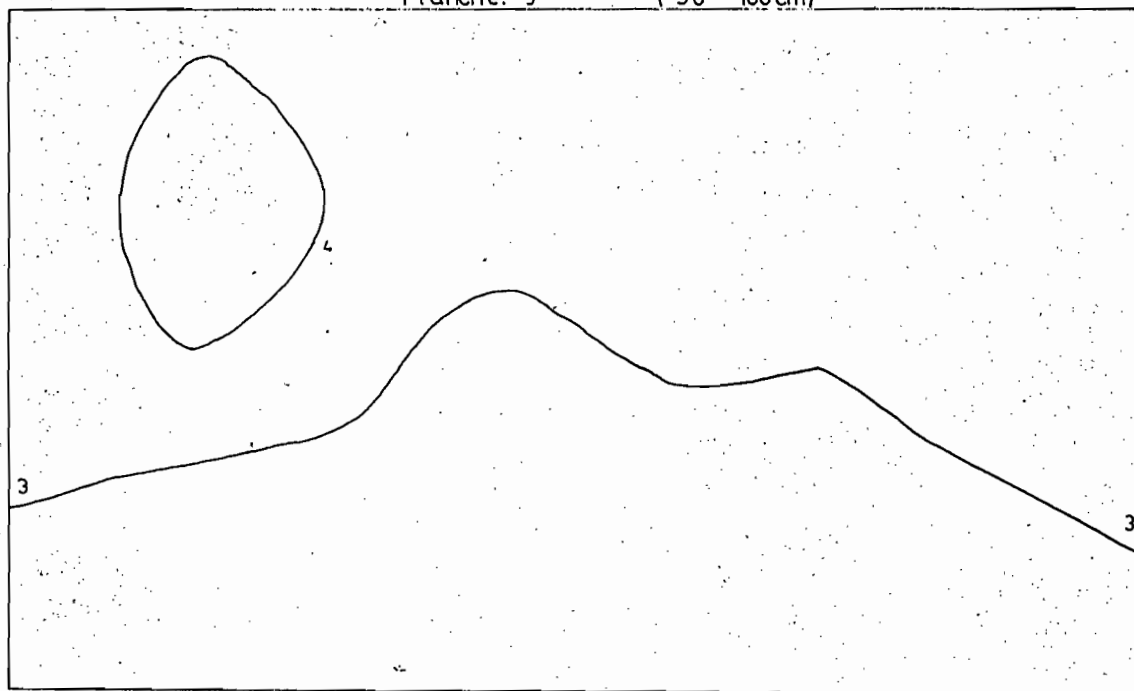
A partir de cette profondeur il n'y a pas d'évolution d'E_{Ca} ni dans le temps ni dans l'espace, du fait que les drains sont placés à 1 m de profondeur, ils régularisent la solution du sol.

a₆. - Planche (110-120 cm) n° 6

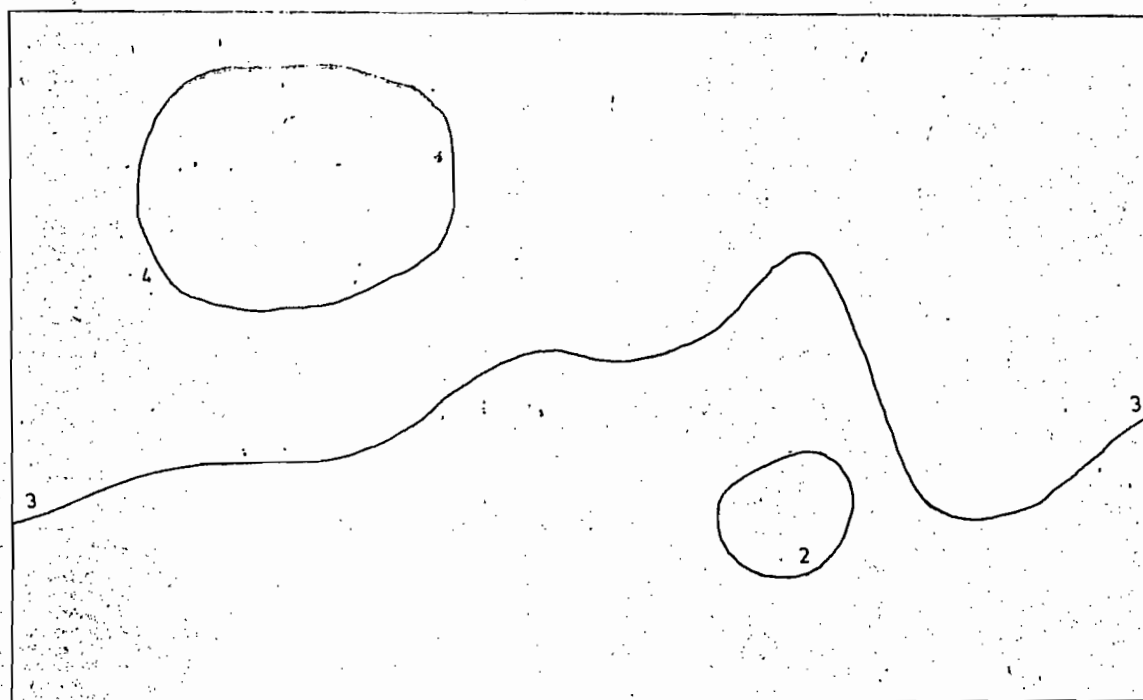
Cette planche montre que si on continue à prospecter en profondeur, la conductivité diminue très lentement et confirme les observations de la planche 90-100 cm.

D'après ces illustrations, la représentation verticale nous permet une vision de l'évolution d'E_{Ca}, en fonction de la profondeur, et une approche de variation horizontale et verticale dans le temps.

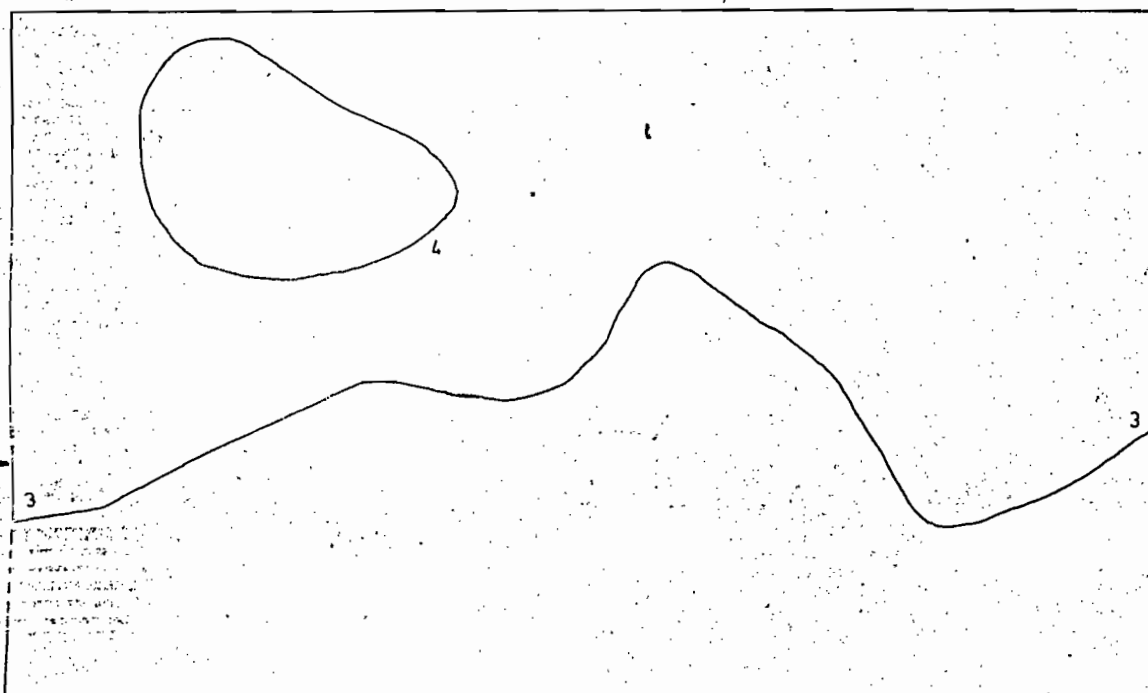
Cette évolution de la salure dépend de plusieurs facteurs. En surface surtout c'est le microrelief et la nature du matériau perméable ou non qui jouent un rôle important dans la stagnation d'eau chargée en sels solubles. Il suffit d'un faible dénivellement pour que l'eau ruisselle longtemps. Elle se charge en sels au cours de son parcours, puis stagne dans les microdépressions, et crée des tâches de fortes concentrations en sels, ce qui explique l'hétérogénéité en surface, avec la présence des îlots et des noyaux de sels par endroit.



1^{ère} couverture



2^{ème} couverture

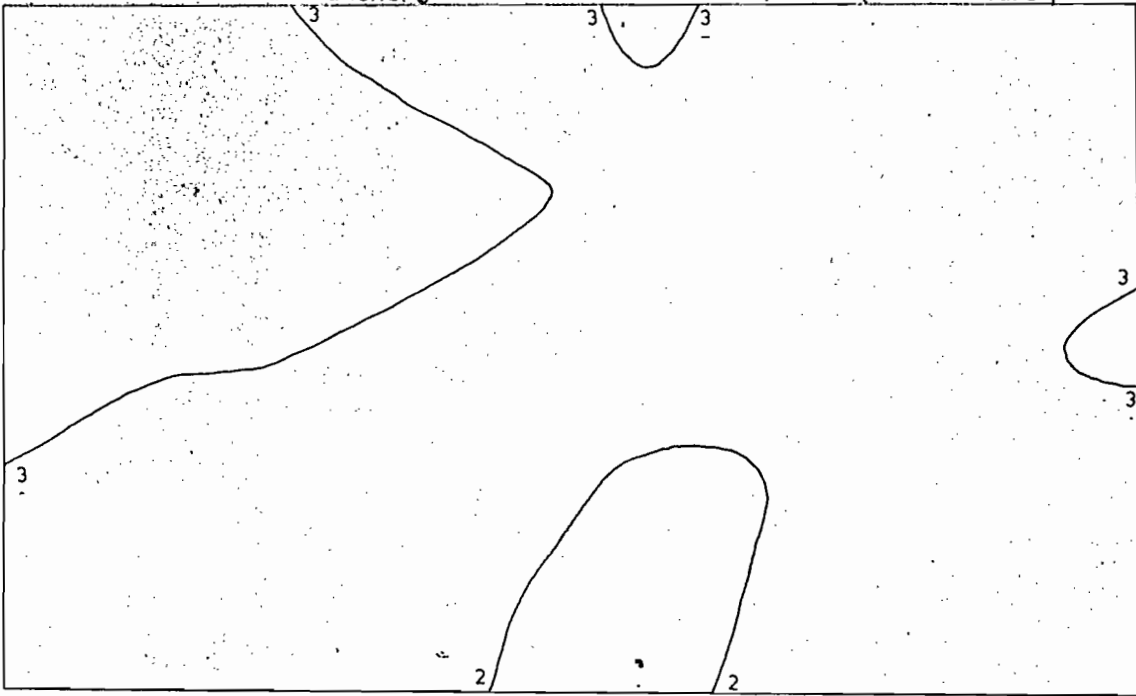


3^{ème} couverture

Planche: 6

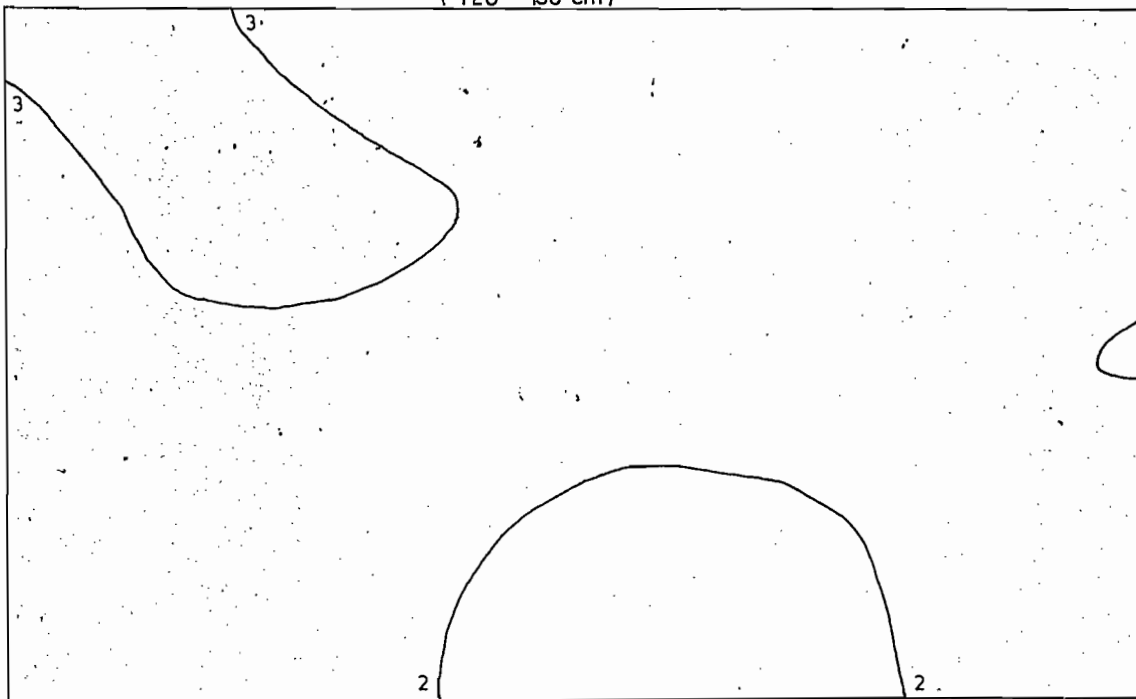
(110 - 120 cm)

[2^e couverture]



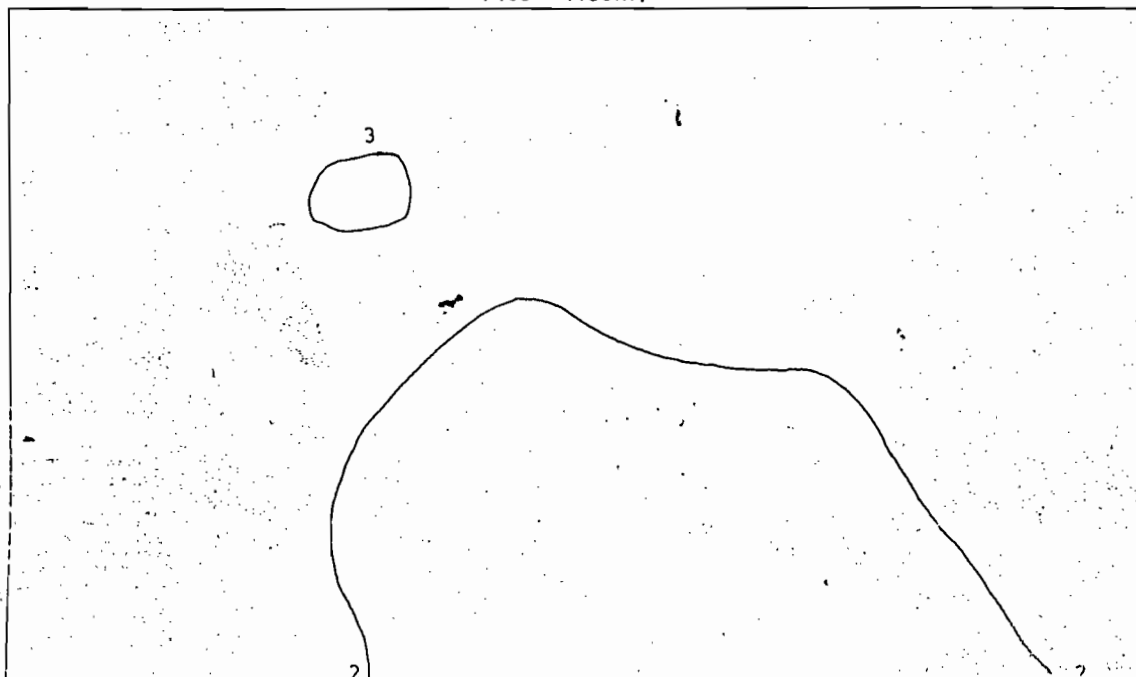
2^e couverture

(120 - 130 cm)



2^e couverture

(130 - 140 cm)



2^e couverture

A partir de 30 cm de profondeur, nous avons des fortes conductivités électriques, mais avec un certain ordre de répartition de la salure suivant la nature du matériau. Par exemple dans la zone à faible conductivité électrique, le sol est assez perméable (sol limono-argileux) par rapport au reste de la parcelle (sol argileux.)

Ceci est très visible à partir de 50-60 cm, où le sol devient de plus en plus homogène (argileux), mais d'autres facteurs interviennent, autre que la nature du matériau et le microrelief, tel que le niveau de battement de la nappe ...

Dès qu'on dépasse la zone de battement de la nappe, presque tous les facteurs qui influent sur la variation d'E_{Ca} sont les mêmes, le matériau est le même, l'influence du microrelief est nulle, la solution du sol est à peu près la même du fait que l'eau de la nappe a une même salure partout dans la parcelle à partir de 100 cm, la conductivité électrique est constante, elle évolue lentement en profondeur.

Après avoir dressé ces cartes des courbes d'isohyales, nous avons jugé utile de creuser quelques profils selon les grandes zones délimitées dans les planches précédentes. Pour comparer les observations morphologiques et analytiques aux profils électriques et pour s'assurer des variables d'E_{Ca}.

C - PROFILS PEDOLOGIQUES ET PROFILS ELECTRIQUES

Le critère majeur de différenciation entre les profils est la position de l'horizon d'accumulation de sels.

Parfois cet horizon commence dès la surface, dans le cas des micro-dépressions et en bas de pente.

Dans d'autres cas il commence à partir de 20 à 30 cm, mais l'épaisseur et l'intensité d'accumulation des sels sont variables en fonction de la profondeur de la nappe et de la nature du matériau.

1. - Profil n° 17A (Figure n° 8)

Ce profil a été choisi parce que la courbe d'ECa en fonction de la profondeur présente trois parties distinctes de 0 à 40 cm l'ECa augmente régulièrement jusqu'à 7,5 mmhos/cm, maximum qui se trouve à 40 cm, puis elle diminue progressivement jusqu'à 75 cm où on a la deuxième cassure de la courbe à 6 mmhos/cm, et enfin de 75 à 100 cm la pente de la courbe est forte et l'ECa est voisine de 3 mmhos/cm à 100. Si nous comparons les observations morphologiques au profil électrique on a :

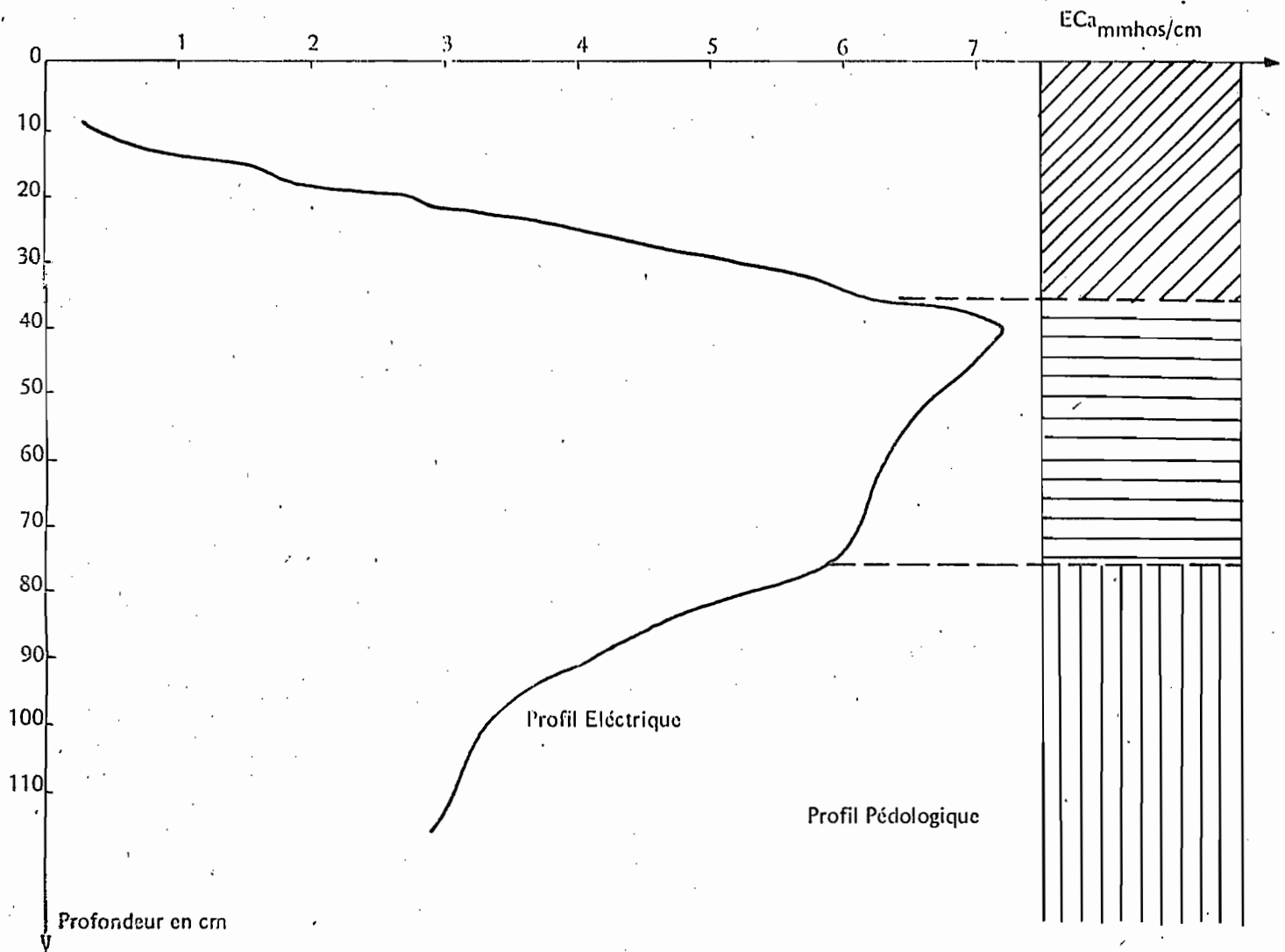
a₁. - Description morphologique




0 - 35 cm : sec, couleur 7,5 YR 6/5, texture argilo-limoneuse, structure polyédrique sub-angulaire, moyenne très nette, poreux, racines, sels solubles diffus, fissures de 10 mm d'écartement, débutant dès la surface, forte effervescence à HCl, limite nette.

35-75 cm : frais, couleur 7,5 YR 4/4, texture argileuse, structure prismatique débutant en polyèdres grossiers, très nette, assez poreux, fissures qui se terminent à 75 cm, sels solubles sous forme de tâches sur les faces luisantes et sur les parois des pores et fissures, effervescence forte, limite diffuse.

75-100 cm + : humide, couleur 7,5 YR 8/5, texture argileuse, structure polyédrique moyenne à grossière, très nette, peu poreux, faces luisantes et faces de glissement, sels solubles diffus, nappe à 100 cm.

Figure 8



-  Horizon sans tâches de sels visibles
-  Horizon a forte accumulation de sels sous forme de tâches
-  Horizon sans accumulation de sels visibles

Profil N° 17 A

a₂. - Résultats analytiques (Tableau n° 7)

L'argile augmente légèrement en profondeur, l'accroissement est de 8 % d'un horizon à l'autre. La matière organique marque un gradient avec la profondeur. Le calcaire total et le calcaire actif gardent le même pourcentage dans tout le profil ; alors que le gypse suit la variation de la courbe d'ECa en fonction de la profondeur, il est de 0,4 % dans le premier horizon, puis 1,2 % dans le 2ème horizon et enfin il chute à 0,3 % dans le 3ème horizon. Le complexe absorbant est assez pourvu en $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ pendant Na/T est fort, il passe de haut en bas de 18 à 33 et 28. On a une nette différence entre l'horizon de surface et ceux de profondeur.

La solution du sol montre fidèlement les variations indiquées par la courbe de la conductivité électrique apparente, et plus particulièrement la conductivité électrique de l'extrait saturé, et le bilan ionique. Les chlorures et les sulfates ainsi que la conductivité électrique de l'extrait saturé indiquent une nette différenciation entre l'horizon de surface, horizon de profondeur et l'horizon d'accumulation de sels.

La courbe d'ECa en fonction de la profondeur, les observations morphologiques et les résultats analytiques confirment la présence de trois niveaux dans le profil différenciés selon l'intensité du facteur sels.

2. - Profil n° 8 (figure n° 9)

C'est un profil choisi dans la zone à faible conductivité électrique apparente, le sol est constitué par deux matériaux différents, un dépôt limono-argileux surmontant un dépôt argileux en profondeur. En surface on note la présence des débris de coquilles. Le profil est situé en bas de pente, mais on n'a pas remarqué la stagnation d'eau pendant la saison hivernale, du fait que le sol est perméable dans sa partie supérieure limono-argileuse.

Le profil salin, (ECa = f(Profondeur) montre une faible conductivité électrique apparente dans les 30 premiers centimètres, puis atteint le maximum à 50 cm (4 mmhos/cm), puis diminue régulièrement jusqu'à 90 cm et se stabilise après (3 mmhos/cm).

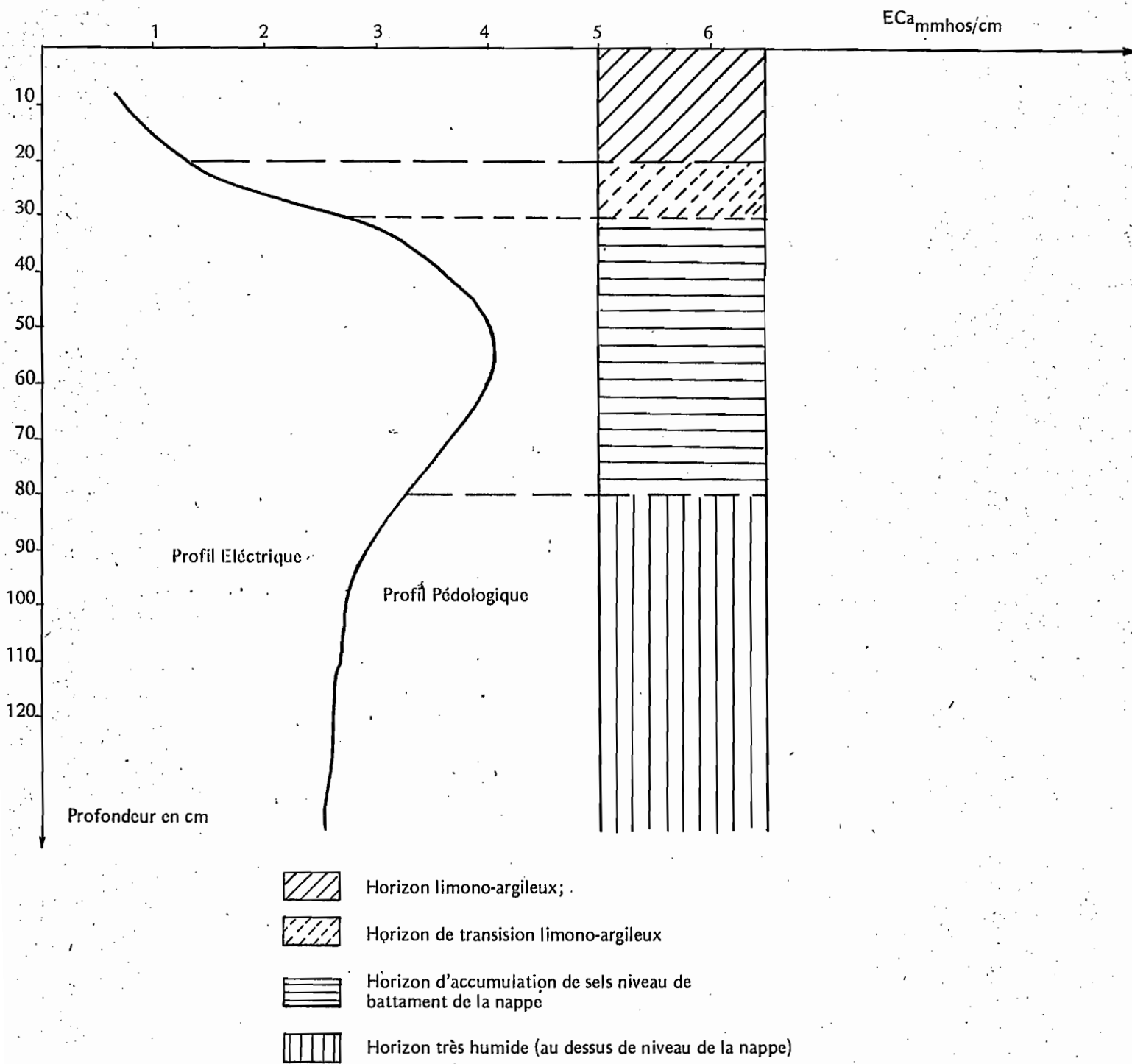
La courbe d'ECa ne montre pas des cassures nettes comme le profil 17A, nous avons un maximum arrondi qui indique l'horizon d'accumulation de sels. Néanmoins nous pouvons distinguer trois parties dans le profil avec des limites diffuses entre eux. La première correspond au dépôt limoneux à 0-30 cm, à faible ECa, puis un horizon de battement de la nappe 30-80 cm, enfin un horizon de la frange de la nappe et la nappe 80-100 cm +.

Tableau n° 7

Profil n° 17 A	Granulométrie (SG)					Matières organiques				Réserves minérales			Complexe absorbant (mé./100 g.)					
Prof.cm	A	LF	LG	SF	SG	MO %	C%	NT %	AH+AF%	CaCO ₃ T%	CaCO ₃ A%	Gypse %	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	T	Na / T
0-35	37	21	10,5	25	2	1;3	0,7	0,08	1,2	24	12	0,4	10,1	3,9	0,9	3	16,9	18
35-75	45	28,5	13	9,5	0,5	0,9	0,5	0,06	1,2	26	16	1,2	9,6	3,1	0,9	6,5	20	33
75-100	53	24,5	10,5	7,5	0,5	0,6	0,4	0,04	0,8	26	17	0,3	9,5	4,4	0,8	5,5	20	28
17 A	Solution du sol (mé.l)										Caractéristiques physiques							
Prof.cm	% SP	pH 1/2,5	ECa mmhos/ cm	CO ₃ H ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Densité réelle	Densité apparente	pF 4,2 %	pF 2,8 %				
0-35	55	8	10,4	8	40	75	31	34	68	0,4	2,4		15	25				
35-75	65	7,8	16,0	6	55	120,0	40	43	100	0,4	2,5		19	31				
75-100	70	8,1	9,8	5	27,5	88,0	15,8	22,2	74	0,2	2,4		20	32				

Résultats analytiques du profil n° 17 A

Figure 9



Profil N° 8

a₁. - Description morphologique

0-20 cm : sec, couleur 7,5 YR 5/4, texture limoneuse à limono-argileuse, structure polyédrique subangulaire moyenne, peu nette, poreux, racines, fissures débutant dès la surface, forte effervescence, limite diffuse.

20-30 cm : horizon de transition, argilo-limoneux.

30-80 cm : frais, couleur 7,5 YR 4/4, texture argileuse, structure polyédrique angulaire, moyenne nette, assez poreux, forte effervescence, sels solubles sous forme de pseudomycélium et petites tâches sur les agrégats, et sur les parois des vides, limite diffuse.

80-100 cm + : humide, couleur 7,5 YR 4/4, texture argileuse, structure polyédrique angulaire moyenne, nette, faces luisantes, très plastique forte effervescence, nappe à 90 cm.

a₂. - Résultats analytiques (tableau n° 8)

L'analyse mécanique montre une individualisation des 30 cm, à dominance de limon par rapport aux horizons argileux de profondeur; le calcaire actif et le pF 2,8 et 4,2 suivent la même variation. Le taux de calcaire total est le même dans tout le profil. La matière organique diminue progressivement avec la profondeur.

La conductivité électrique de l'extrait saturé, et le bilan ionique suivent la même variation que la courbe ECa en fonction de la profondeur, de même pour Na/T.

Ce profil présente l'originalité d'avoir deux types de matériaux superposés, le contact entre les deux est diffus.

La nature du matériau joue un rôle important sur la conductivité électrique et le profil est en bas de pente, l'eau de ruissellement s'infiltre en profondeur et entraîne les sels solubles, nous avons un horizon de surface lessivé des sels, en profondeur seul l'influence de la nappe à 90 cm conditionne la formation d'horizon d'accumulation de sels par les phénomènes capillaires qui se limitent dans les horizons argileux. Car pendant la saison sèche, le limon de surface forme une pellicule de battance et la prise en masse limitent l'évaporation ce qui explique une faible conductivité électrique dans l'horizon de battement de la nappe par rapport aux autres horizons analogues mais sans dépôt limoneux en surface.

Donc nous constatons l'influence de la nature du matériau sur l'accumulation des sels.

Tableau n° 8

N°Prof. 8	Granulométrie (%)					Matières organiques				Réserves minérales			Complexe absorbant (mé/100 g.)					
Prof.cm	A	LF	LG	SF	SG	MO %	C%	NT %	AH+AF %	CaCO ₃ T%	CaCO ₃ A%	Gypse %	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	T	Na/T
0-20	27,5	16,5	13	30	12	1,2	0,7	0,1	1,1	22	6	0,6	7,2	2,2	0,8	1,3	11,3	11
20-30	29,5	17,5	13,5	28	9,5	0,9	0,5	0,06	0,7	23	6	T	6,5	2,8	0,5	2,3	12	19
30-80	40,5	20,5	15,5	18	1,5	0,6	0,3	0,06	0,7	24	11	T	7,4	2,8	0,5	4,9	15,6	31
80-100	-	-	-	-	-	0,6	0,3	0,07	0,7	25	14	0,14	8,8	2,9	0,6	5,6	18,1	31
8	Solution du sol (mé/l.)										Caractéristiques physiques							
Prof.cm	% SP	pH	ECa mmhos/cm	CO ₃ H ²	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Densité réelle	Densité apparente	pH 4,2 %	pF 2,8 %				
0-20	50	8,2	0,9								2,4		11,5	21				
20-30	50	8,4	2,3	8	12	9,4	3,7	5,3	18,7	0,7	2,6		12,1	22				
30-80	62,5	8,2	10,6	7	40	88	18,4	24,6	87	0,1	2,4		16	27,5				
80-100	72,5	8,3	7,3	6	17	54	9,1	10,9	55	0,1	2,4		18,4	31				

3. - Profil n° 15 (Figure n° 10)

La situation du profil 15 est analogue à celle du profil 8, il est en bas de pente dans les microdépressions mais nous n'avons pas un dépôt limoneux en surface, le sol est argileux, peu perméable, l'eau stagne pendant les pluies, l'évaporation est plus importante que la percolation, juste après ressuyage du sol, les efflorescences de sels sont visibles en surface.

a₁. - Profil salin

La conductivité électrique apparente est forte dans l'ensemble du profil (0-70 cm). Cette forte conductivité est due à deux actions combinées et qui se chevauchent. L'eau de ruissellement chargée en sels des parties avoisinantes stagne, s'infiltrent peu, et la plupart des sels restent en surface (0-20 cm). A cette action s'ajoute les phénomènes capillaires qui intéressent la tranche du sol de 70 à 90 cm, et plus particulièrement l'horizon entre 20-40 cm qui montre une cassure de la courbe avec un maximum d'ECa entre 40-80 cm, la courbe présente des irrégularités après elle se stabilise.

a₂. - Description morphologique (figure n° 10)

0 - 15 cm : horizon de labour, sec, couleur 7,5 YR 5/6 - argilo-limoneux, structure polyédrique angulaire, moyenne nette, petites tâches de sols sur les agrégats et dans les vides, fissures, forte effervescence, limite nette.

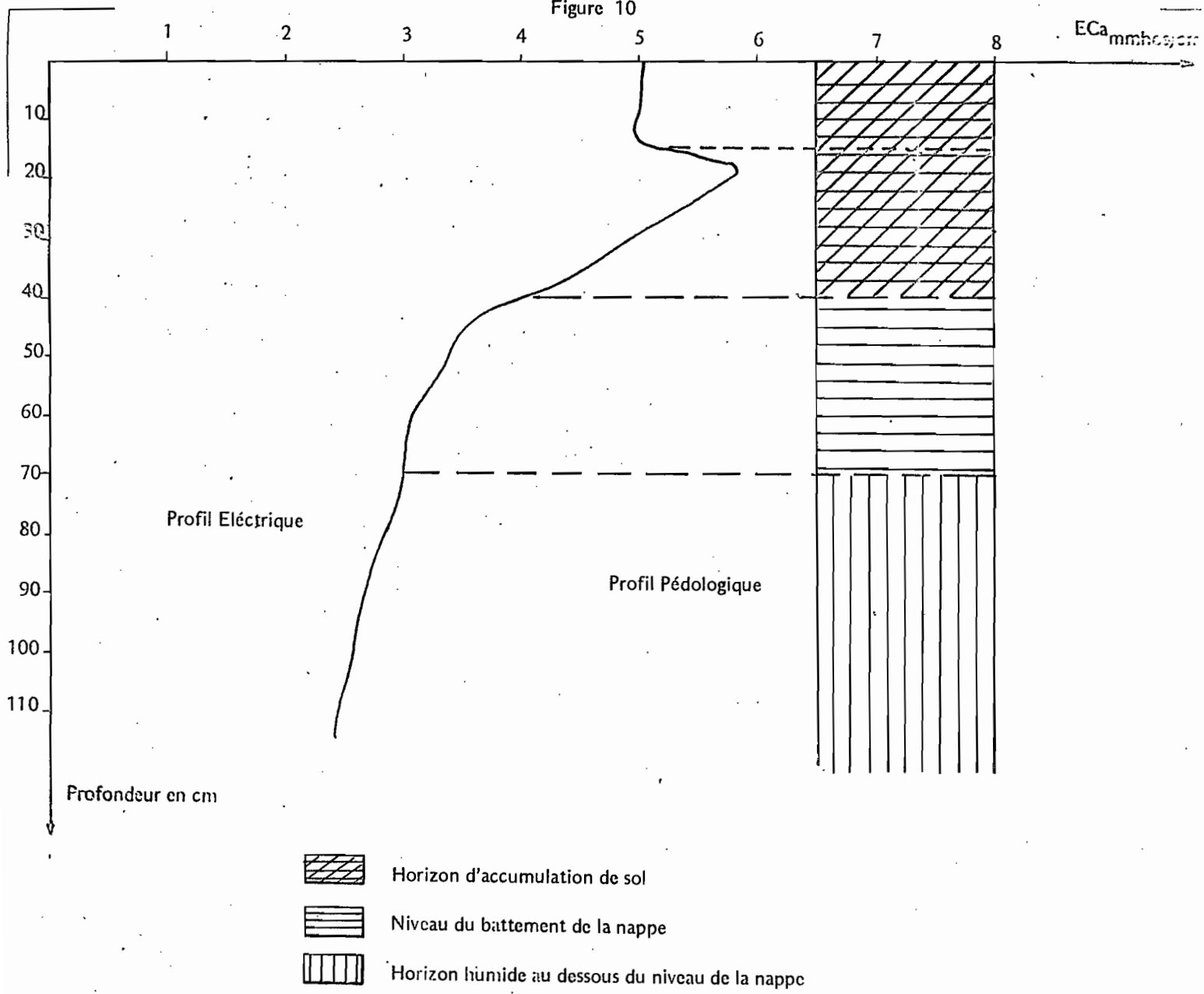
15-40 cm : frais, 7,5 YR 4/4, texture argilo-limoneuse, structure polyédrique grossière nette, tâches des sels sur les faces verticales des agrégats sur les parois des vides, fissures, fortes effervescences, limite diffuse.

40-70 cm : frais, couleur 7,5 YR 4/4, texture argileuse, tâches de couleur 10 Y 7/0, d'oxydo-réduction, irrégulières contrastées, liées aux faces des agrégats, faces luisantes et de glissement, structure prismatique très nette, se débitant en polyèdres grossiers tâches de sols, sur les faces horizontales des agrégats (faces luisantes), limite diffuse.

70-100 cm + : humide, couleur 7,5 YR 5/6, argileux, structure polyédrique anguleuse grossière très nette, faces luisantes et de glissement, sels solubles diffus.

nappe ≈ 80 cm.

Figure 10



Profil N° 15

Tableau n° 9

N°Prof. 15	Granulométrie (%)					Matières organiques				Réserves Minérales			Complexe absorbant (mé/100g)					
Prof.cm	A	LF	LG	SF	SG	MO %	C%	NT %	AH+AF %	CaCO ₃ T%	CaCO ₃ A%	Gypse %	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	T	Na / T
0-15	41	28	12,5	12	2	1,5	0,9	0,05	1,5	24	12	1,9	9,7	2,5	1,5	6,2	20	31
15-40	39,5	31,5	11,5	12	1,5	1,1	0,6	0,06	1,3	25	8	2,4	6	2,4	1,3	9,1	18,8	48
40-70	7	76,5	8	5,5	0,5	0,7	0,4	0,04	0,8	25	16	0,6	5,9	4,7	1	8,5	20	42
70-100	54	25	7,5	8,5	1	0,7	0,4	0,07	0,7	24	13	0,4	9,4	2,4	1,1	7,3	20	37
15	Solution du sol (mé.1)										Caractéristiques physiques							
Prof.cm	% SP	pH	ECa mmhos/ cm	CO ₃ H ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Densité réelle	Densité apparente	pF 4,2%	pF 2,8 %				
0-15	67,5	7,8	15	8	75	120	36	43	120	0,7	2,4		22	31				
15-40	65	8	19,5	7	74	140	38	54	135	0,7	2,4		21	39				
40-70	75	8,2	10	5	40	80	14,5	19,5	82	0,3	2,4		23	30				
70-100	95	8,4	4,3	3	12,3	28,8	3,7	8,3	32	0,1	2,4		26	34				

a₂. - Résultats analytiques (Tableau n° 9)

Dans ce profil, la solution du sol à savoir la conductivité électrique de l'extrait saturé et le bilan ionique suivent la variation de la courbe d'E_{Ca}, de même pour le gypse et Na/T. Ces variables ont des valeurs plus élevées dès la surface.

On remarque aussi que les 40 premiers centimètres se caractérisent du reste du profil en plus de la salure, par la matière organique et par suite l'acide humique et fulvique.

Ce profil montre deux caractéristiques, l'une en ce qui concerne la salure, il met en relief, les observations morphologiques de surface, une salure forte dès les premiers centimètres. L'autre la partie irrégulière de la courbe d'E_{Ca} met en évidence l'hétérogénéité dans le matériau à savoir la présence des tâches d'oxydo-réduction liées à un engorgement temporaire de l'eau à ce niveau. Donc une fois de plus les observations morphologiques, la courbe d'E_{Ca} et les résultats analytiques concordent.

4. - Profil n° 35 (Figure n° 11)

Ce profil se situe dans la zone à forte conductivité électrique comme le 15, mais il n'est pas dans une microdépression, il a un horizon d'accumulation de sels qui commence à partir de 20 cm, de même le niveau de la nappe est plus bas que le 15.

a₁. - Description morphologique

0-35 ± 5 cm : sec, argileux, structure polyédrique moyenne, nette, fissures, quelques petites tâches de sels par endroit, limite diffuse.

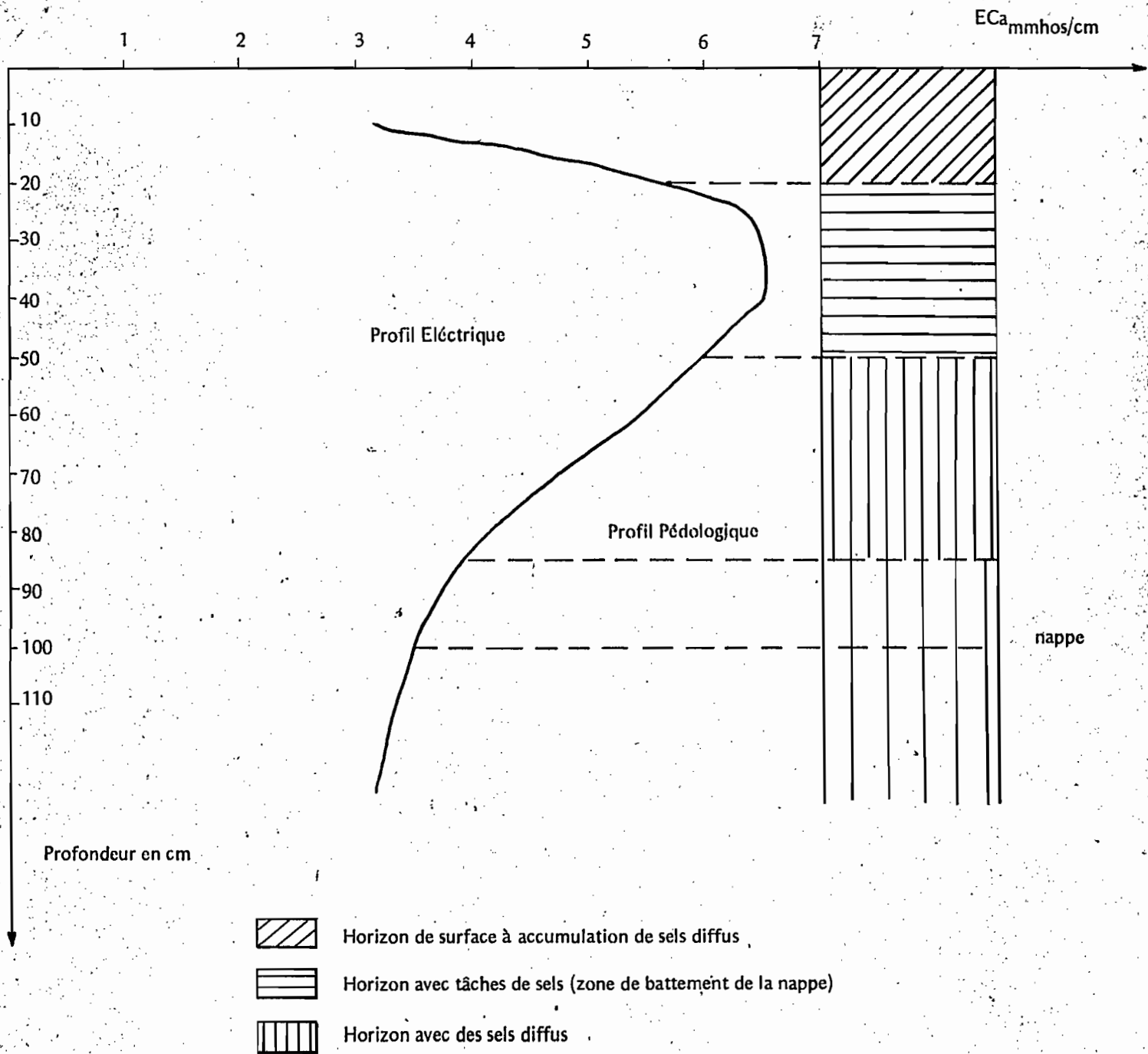
35 ± 5 - 50 cm ± 5 : frais, horizon argileux, structure prismatique se débitant en polyèdres grossiers, tâches de sels solubles nombreuses sur les faces verticales des prismes, ou des polyèdres grossiers, et dans les fissures, limite diffuse.

50 cm ± 5 - 100 ± cm : horizon frais à humide, avec des sels solubles, diffus, nappe à 100 cm.

a₂. - Résultats analytiques (Tableau n° 10)

Ce profil a une conductivité électrique apparente forte dans l'ensemble du profil avec E_{Ca} élevée dans l'horizon d'accumulation des sels. Comme les autres profils la solution du sel suit parallèlement

Figure 11



Profil N° 35

Tableau n° 10

N°Prof. 35	Granulométrie (%)					Matières organiques				Réserves minérales			Complexe absorbant (mé./100 g)					
Prof.cm	A	LF	LG	SF	SG	MO %	C%	MT %	AH+AF%	CaCO ₃ T%	CaCO ₃ A%	Gypse %	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	T	Na/T
0-35+ 5	45	26,5	12,5	11,5	1	1,5	0,9	0,1	1,2	25	17	0,3	12,7	2,3	1,1	3,9	20,2	19
35+5-50	42	31,5	9,5	10	0,5	1	0,6	0,11	1,2	24	17	1,8	10,4	2,5	1,1	6,2	20	31
50-100	52,5	27,5	9	6,5	0,5	0,7	0,4	0,04	0,9	26	20	1,2	13,3	3,7	0,9	6,6	24,4	27
35	Solution du sol (mé./l.)										Caractéristiques physiques							
Prof.cm	% SP	pH	ECa mmhos/cm	CO ₃ H ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Densité réelle	Densité apparente	pH 4,2%	pF2,8 %				
0-35	70	8	5,8	6	30	37,5	12,4	11,2	44	0,3	2,5		20	33				
35-50	67,5	7,8	25	6	62,5	120	34	31	114	0,4	2,5		20	31				
50-100	67,5	8	16	8	74	110	36	44	118	0,4	2,5		23	33				

la variation d'ECa, mais nous constatons pour l'horizon à forte concentration en sels que l'ECa est sous-estimée par rapport à ECa (conductivité de l'extrait saturé).

D'une façon générale, ce profil se distingue des autres profils par l'épaisseur de l'horizon d'accumulation. Il est plus épais, du fait que la profondeur de la nappe est à 100 cm et le sol plus argileux que les autres profils, les phénomènes capillaires sont très importants, ce qui explique l'épaisseur de l'horizon d'accumulation de sels.

5. - Profil n° 39 (Figure n° 12)

Ce profil a été creusé essentiellement pour voir les effets du drain placé à 1 m, sur le drainage et l'évacuation de l'eau, et les conséquences sur les sels.

Le sol est argileux, mais le profil salin présente une faible conductivité en surface jusqu'à 30 cm, horizon qui correspond à l'horizon lessivé plus ou moins en sels par les eaux de pluies, puis une conductivité assez forte dans l'horizon d'accumulation de sels, mais les sels sont sous forme de pseudo-mycéliums et d'efflorescences salines, on note l'absence totale des dépôts de sels sous forme de tâches bien que ce profil occupe une position analogue au profil 35. à partir de 70 cm, nous avons la conductivité faible, dans l'horizon humide, près du drain. Après nous avons une irrégularité dans la courbe au niveau du drain, zone avec des tâches d'hydromorphie où l'eau stagne avant d'être évacuée lentement par le drain, et parallèlement la conductivité augmente légèrement dans cette zone (Tableau n° 11).

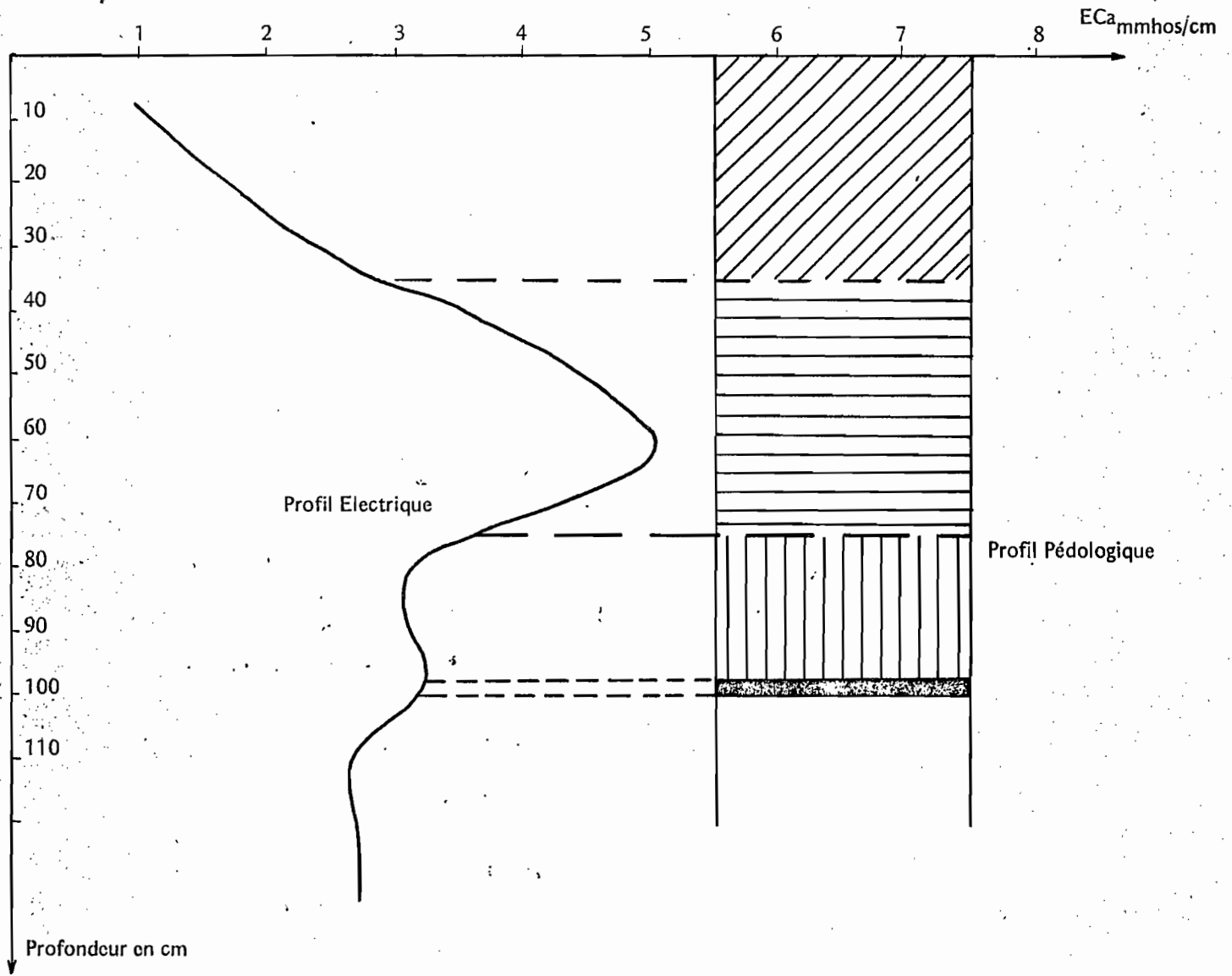
Ce profil met en évidence, l'effet du drain sur le profil salin, la conductivité électrique est moyenne à faible dans l'ensemble du profil relativement, si on compare ce profil à d'autres qui ont le même matériau et la même position géographique dans la parcelle.





6. - Profil 24A (Figure n° 13) et tableau n° 12

Ce profil est simplement donné en exemple pour le comparer avec le profil 17 A qui sont tous les deux distants de 20 m.

Au point de vue pédologique et observations morphologiques c'est la même chose dans les deux profils, la seule différence avec les conséquences qui en découlent, c'est que dans le profil 17A nous avons les horizons qui sont bien limités soit dans les observations morphologiques ou dans la courbe ECa en fonction de la profondeur, alors que ^{dans} le profil 24A, les limites sont diffuses.

Figure 12



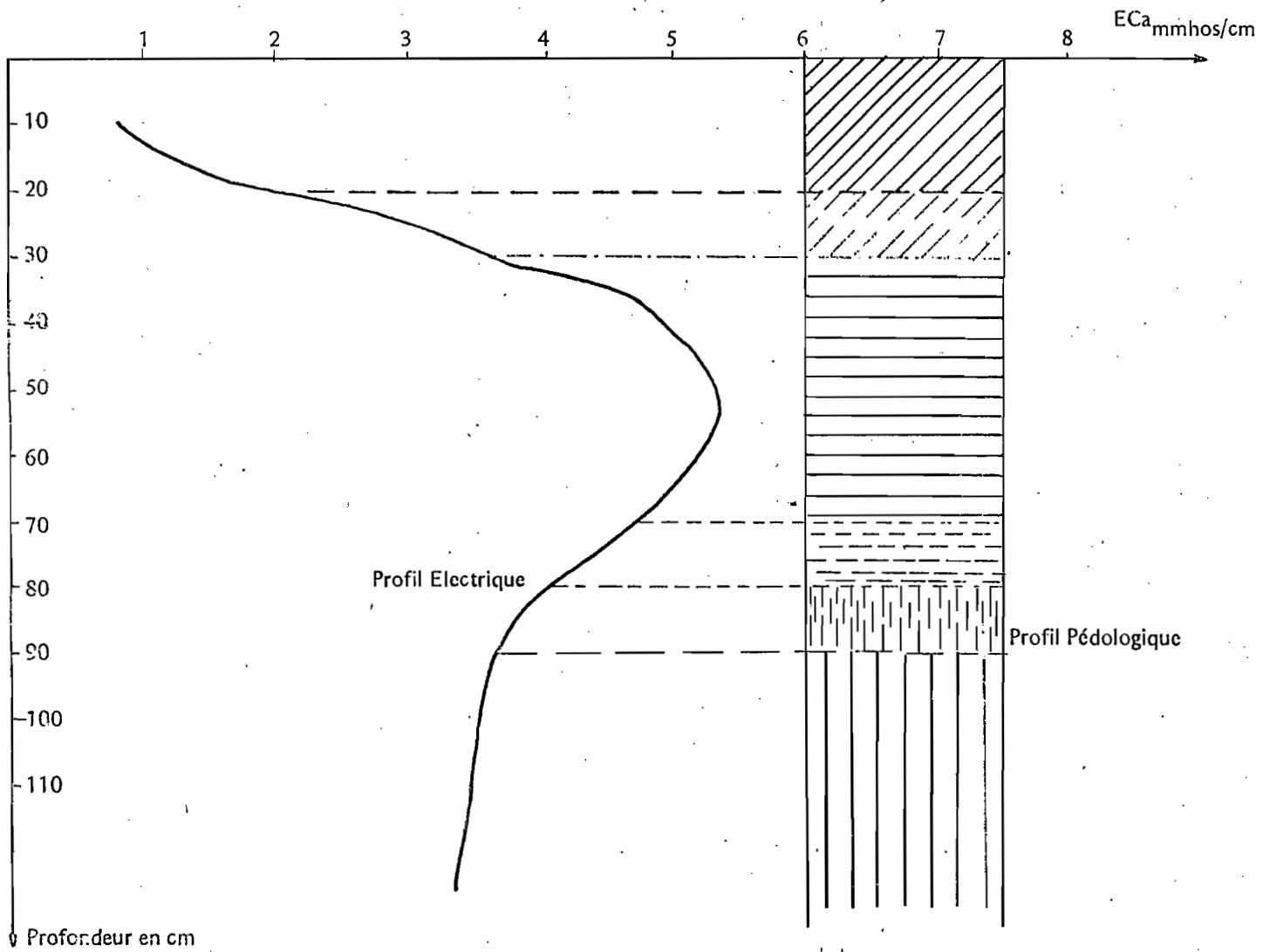
-  Horizon de surface à faible salure
-  Niveau de battant de la nappe et accumulation de sels
-  Niveau de la nappe
-  Drain avec une zone d'hydromorphie





Profil N° 39

Tableau n° 11

N°Prof. 39	Granulométrie (%)					Matières organiques				Réserves minérales			Complexe absorbant (mé.100 g.)					
Prof.cm	A	LF	LG	SF	SG	MO %	C%	NT %	AH+AF%	CaCO ₃ T%	CaCO ₃ A%	Gypse %	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	T	Na/T
	47,5	27,5	10,5	9	1	1,4	0,8	0,09	1,3	25	14	0,3	8,8	3,3	1,3	2,8	16	17
	48	32	9,5	6,5	0,5	0,8	0,5	0,05	0,8	24	15	0,4	9	4,1	1	5,7	19,7	29
	53,5	27	9,5	7	0,5	0,5	0,3	0,05	0,7	25	18	0,1	7,7	4	0,8	5,5	18,1	30
39	Solution du sol (mé.1)										Caractéristiques physiques							
Prof.cm	% SP	pH	ECa mmhos/ cm	CO ₃ H ⁻	SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Densité réelle	Densité apparente	pF4,2%	pF 3 %				
	65	8,2	1,2								2,4		20	35				
	65	8,1	7,9	4	23	62,5	15,1	17,9	60	0,2	2,3		19,4	32,6				
	80	8,3	5,3	4	17,5	40	6,2	11,8	47	0,1	2,3		19,9	32				

Figure 13



-  Horizon de surface à faible salure
-  Horizon de transition
-  Horizon à accumulation de sels (zone de battement de la nappe)
-  Horizon à faible salure (niveau de la nappe)

Profil 24 A

Tableau n° 12

N°Prof. 24A	Granulométrie %					Matières organiques				Réserves minérales			Complexe absorbant (Mé.100 g.)					
Prof.cm	A	LF	LG	SF	SG	MO%	C%	NT %	AH+AF%	CaCO ₃ T%	CaCO ₃ A%	Gypse %	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	N ⁺	T	Na / T
0-35	41	23	12,5	17	2,5	1,5	0,9	0,09	1,2	25,9	15	T	11,9	5,1	1	2,2	20	11
35-75	40,5	22	12,5	15,5	6	1,1	0,6	0,08	1,0	24	14	1,2	13,1	3	0,8	3	20	15
	46	24	13,5	12	1	1,1	0,6	0,06	0,8	21,4	15	0,6	11,9	2,3	0,8	4,9	20	25
	46,5	21	11	17,5	0,5	0,5	0,3	0,09	0,7	29,4	14	0,3	10,6	3,1	0,8	5,1	19,6	20
24A	Solution du sol (mé./l)										Caractéristiques physiques							
Prof.cm	% SP	pH1/2,5	ECa mmhos/cm / CO ₃ H ⁻		SO ₄ ⁻⁻	Cl ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Densité réelle	Densité apparente	pH 4,2%	pF 2,8 %				
	57,5	8,7	2,5	5	5,4	14,0	6,2	5,8	14,4	0,2	2,5		17	28				
	55	7,8	9,8	4	52,0	75,0	33,0	33,0	65,0	0,3	2,5		17	27				
	65	7,8	11,8	5	49,0	100,0	33,0	34,0	82,0	0,2	2,4		19	31				
	72,5	8,1	8,5	5	22,5	65,0	18,2	23,8	56,0	0,2	2,4		18	30				

Nous pouvons tirer quelques conclusions à partir des confrontations du profil salin, avec les observations morphologiques et les résultats analytiques.

La courbe d'ECa représente le phénomène de salure d'un point, elle est fortement liée à la solution du sol et les sels en réserves minérales.

Toute variation ou irrégularité de la courbe est liée aux paramètres qui interviennent pour favoriser ou diminuer l'accumulation des sels; tels que la nature du matériau qui intervient par ses propriétés physiques pour faciliter l'évacuation des sels ou freiner la percolation de l'eau, le sol acquiert une salure de plus en plus forte selon le microrelief, (ou l'intervention de l'homme comme dans le cas du profil 39 avec un drain à 100 cm.)

Tous ces facteurs sont détectés indirectement par la méthode électrique, elle permet de nous renseigner sommairement sur la nature pédologique du profil puisque le facteur de pédogenèse essentiel qui importe dans ces sols est la salure.

Donc nous mesurons la conductivité électrique apparente de la solution du sol et indirectement les caractères qui interviennent dans la modification de cette salure.

D - COUPES VERTICALES DES COURBES D'ISOHYALINES

Après avoir dressé les cartes des courbes d'isohyales nous avons tenté de présenter quelques coupes pour compléter cette représentation horizontale pour voir la variation de la conductivité électrique apparente d'une façon continue d'un ensemble de points avec la profondeur (planche n° 7).

La distance entre les coupes au terrain est de 20 m. Nous constatons qu'en surface nous avons des plages de conductivité différentes soulignant les hétérogénéités dues à des causes citées ci-dessus. A partir de quelques centimètres de surface nous remarquons une répartition horizontale et verticale de la salure selon les facteurs de terrain. Ces coupes mettent en évidence l'influence des différents paramètres qui interviennent dans la salure, notons que la partie gauche de chaque coupe présente des fortes conductivités. Si cette forte conductivité est due au microrelief, elle affecte plus particulièrement les horizons de surface puis diminue en profondeur, en formant un noyau concentrique dans le sol avec ses dimensions verticales et horizontales.

Si la salure est due aux remontées de la nappe nous avons des grandes tâches étendues.

Un autre intérêt de ces coupes est qu'elles nous renseignent sur l'extension des niveaux hétérogènes, par exemple dans la coupe 2, le profil n° 11 qui présente un niveau sableux piégé. Ce niveau est bien isolé dans la coupe avec précision dans la profondeur et une approche dans son étendue. D'autre part, remarquons, le niveau de la nappe, qui se caractérise par une faible conductivité et qui est constante. En bas de pente, ce niveau est proche de la surface.

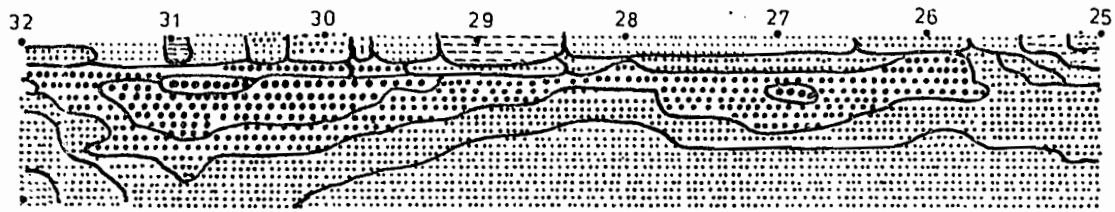
E - VARIATION D'ECa DANS LE TEMPS

La variation d'ECa dans le temps comme nous l'avons vu dans la représentation horizontale, dépend des types de profils.

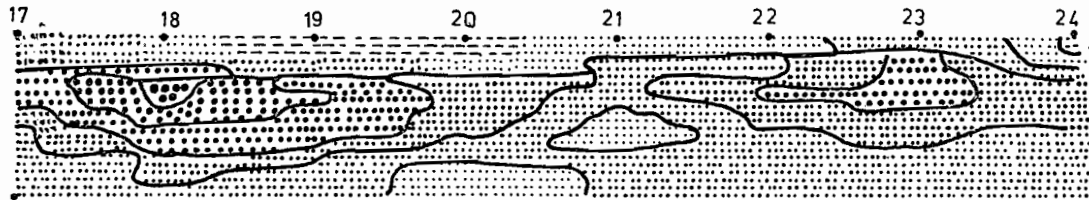
La représentation verticale met en évidence la variation d'ECa dans le temps et en profondeur beaucoup mieux que la représentation horizontale.

Nous donnons trois exemples de cette variation pour trois points différents.

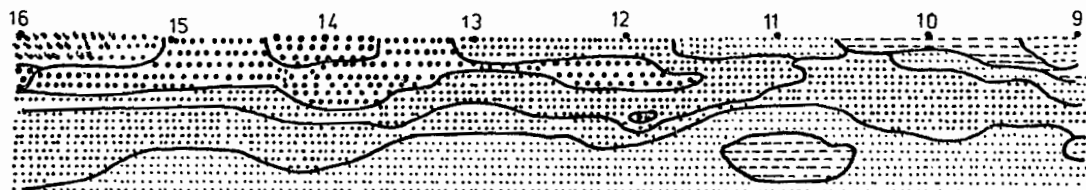
Coupes verticales des courbes d'isohyales



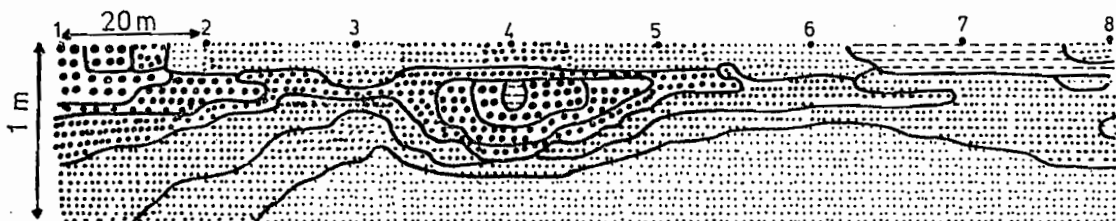
Coupe N° 4



Coupe N° 3



Coupe N° 2



Coupe N° 1

Légende

	$EC\alpha \leq 1$
	$1 \leq EC\alpha \leq 2$
	$2 \leq EC\alpha \leq 3$
	$3 \leq EC\alpha \leq 4$
	$4 \leq EC\alpha \leq 5$
	$5 \leq EC\alpha \leq 6$
	$6 \leq EC\alpha \leq 7$
	$7 \leq EC\alpha \leq 8$

1. - Figure n° 14

Cette figure représente 3 profils salins, pour les trois campagnes de mesures (profil n° 15).

La courbe n° 1, indique une salure initiale. L'E_{Ca} est élevée dans la 2ème courbe par rapport à la première, ceci s'explique par le fait que pendant les pluies, on a eu un apport latéral de sels car le profil se situe dans une microdépression. L'influence des apports latéraux se manifeste d'une façon intense en surface puis ils diminuent avec la profondeur jusqu'à 50-60 cm. La 3ème courbe représente le profil salin au printemps une partie des sels est entraînée en profondeur, et la conductivité électrique apparente tend à reprendre son état initial.

Au cours de l'année, dans ce type de profil, la variation intéresse essentiellement les horizons de surface et plus particulièrement les 20 premiers centimètres et en profondeur quand on atteint la nappe, la solution du sol ne change pas au cours de l'année.

2. - Figure n° 15

Ce profil correspond à la zone à forte conductivité électrique apparente, mais en haut de pente. Dans ce profil nous n'avons pas des apports latéraux, le sol est salé dès la surface. Nous avons une faible variation dans les horizons de surface, alors que le front de salinité qui correspond à l'horizon d'accumulation des sels connaît une grande variation.

Dans la première courbe le maximum de la courbe d'E_{Ca} est élargie, pendant les pluies le sol est peu perméable. Nous avons une forte dissolution de sels, le maximum de la courbe est bref, et l'E_{Ca} passe de 6 mmhos/cm à 8,5 mmhos/cm, puis elle diminue légèrement en profondeur jusqu'à 100 cm qui correspond au niveau de la nappe.

Dans la troisième courbe, la cassure de la courbe commence à reprendre la forme initiale.

Dans ce type de profil, les variations intéressent l'horizon moyen d'accumulation de sels, et on note une dissolution maximale des sels pendant les pluies.

Figure 14

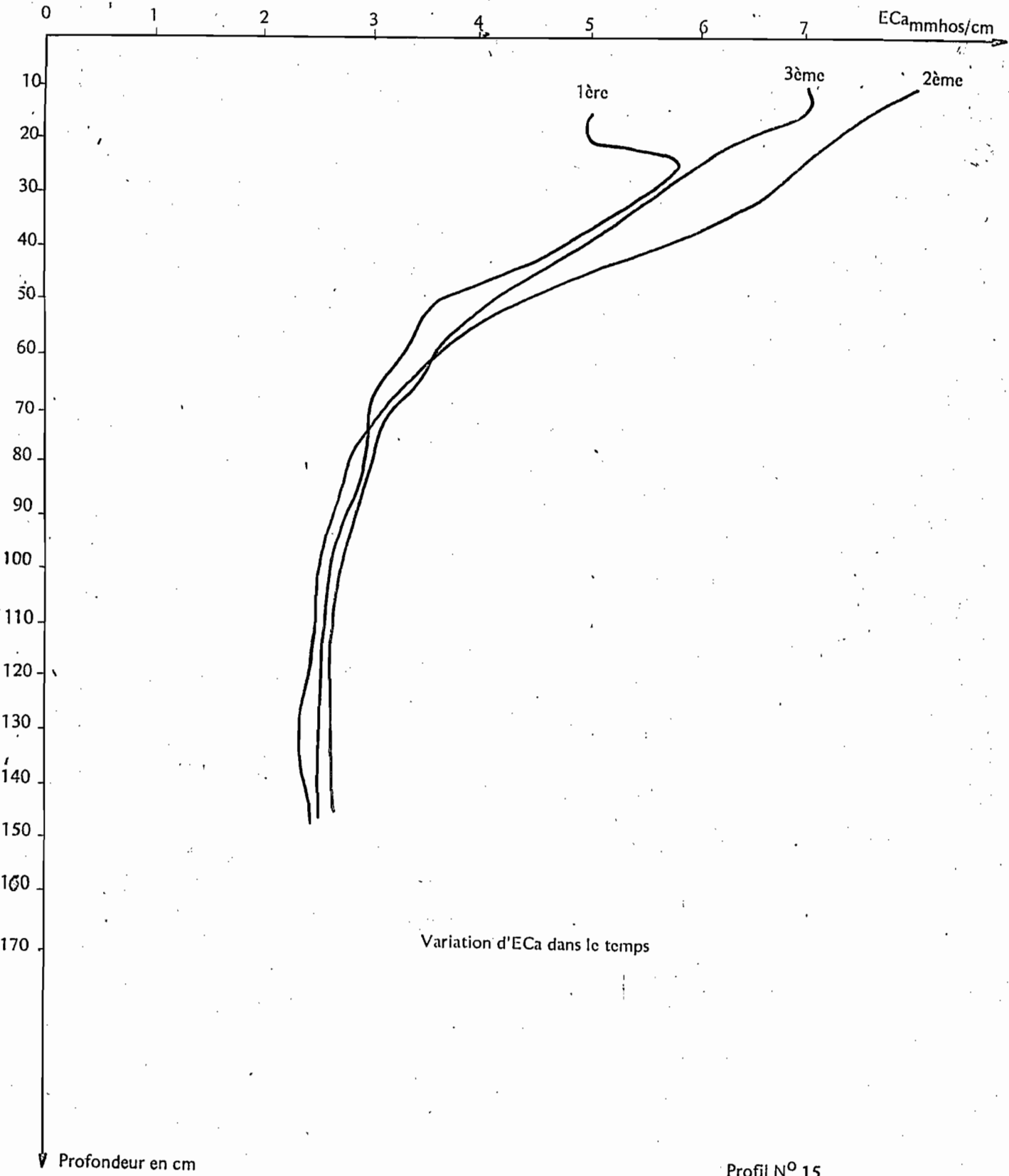
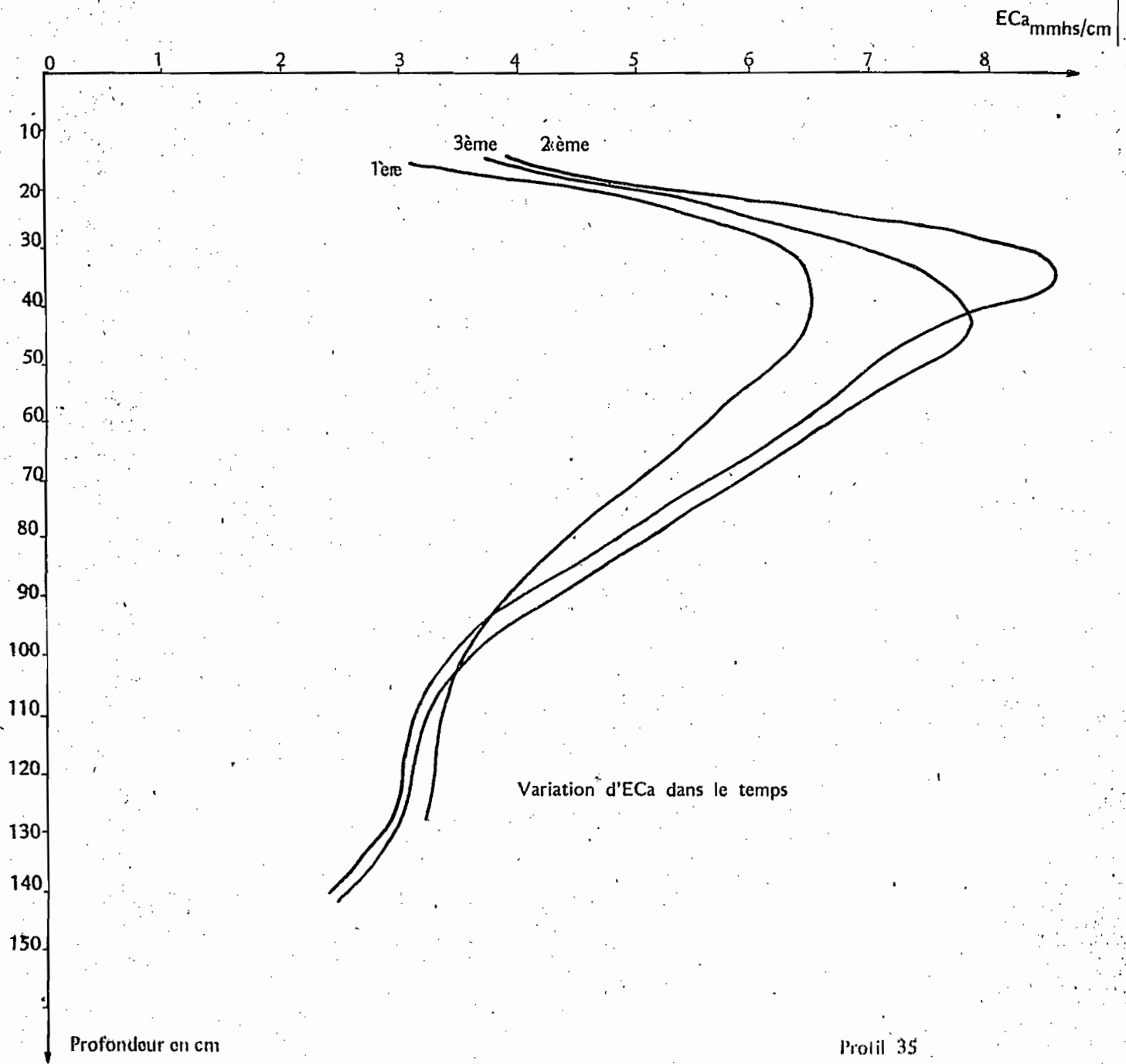


Figure 15



3. - Figure n° 16

Ce profil est situé dans la zone à sol perméable en surface, et à faible conductivité électrique apparente.

La conductivité électrique apparente est faible dans l'ensemble du profil ; la première courbe indique une conductivité initiale, la deuxième après les pluies, on remarque un lessivage net des sels jusqu'à 60 cm, et la troisième courbe, quand le sol commence à se dessécher nous remarquons bien que les phénomènes capillaires commencent à se manifester, et la courbe s'approche de l'état initial alors qu'en profondeur nous n'avons pas de changement d'ECa.

Les trois exemples montrent la variation d'ECa dans le temps et en profondeur.

Ces variations ont une intensité variable selon les conditions locales de l'emplacement du profil.

Parfois ces variations sont grandes en surface quand les apports latéraux existent, et le sol est peu perméable. La conductivité est forte dans tout le profil, mais en général la courbe d'ECa est typique, elle ne présente pas de "cassure," elle a une valeur maximale dès la surface.

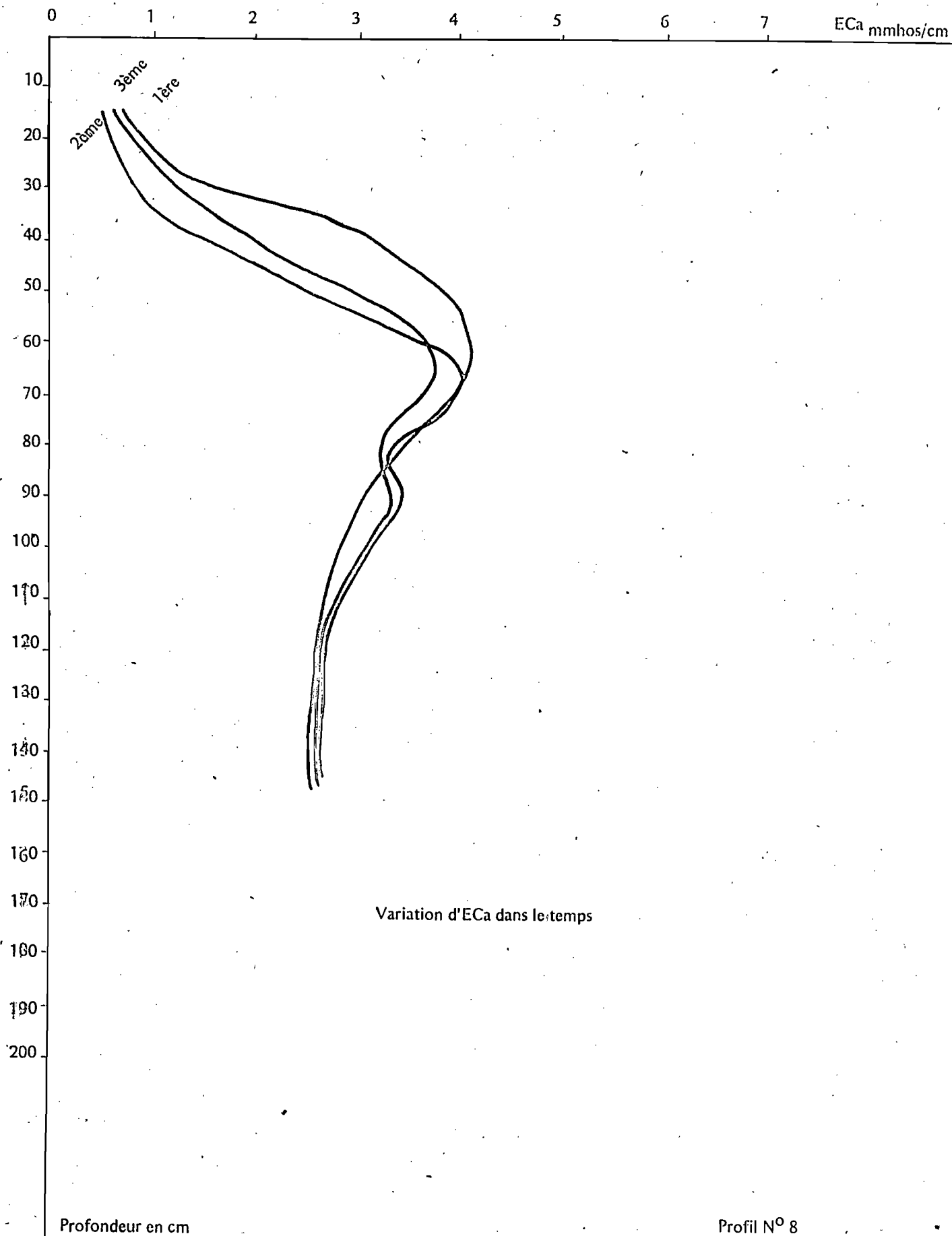
Parfois dans la même tâche la conductivité est forte dans l'ensemble du profil, mais sans apports latéraux, et le sol peu perméable, les horizons de surface gardent la même salure à peu près, et seul l'horizon d'accumulation des sels marque des variations d'ECa.

Dans une même tâche de sol à forte conductivité nous pouvons faire la part qui revient aux apports latéraux.

Enfin quand un sol est perméable, nous assistons à deux variations inverses. Pendant les pluies les sels sont entraînés en profondeur, et quand il fait chaud, le mouvement inverse des sels commence par l'intermédiaire des remontées capillaires.

Dans l'ensemble de la parcelle nous pouvons dire que la variation d'ECa avec le temps intéresse les horizons de surface (niveau de battement de la nappe et en-dessus), et en profondeur dans tous les types de sol l'ECa est constante et elle prend la valeur de la conductivité de l'eau de la nappe.

Figure 16



Donc d'après les différentes représentations nous pouvons dire que la représentation verticale donne une image réelle et précise de l'ensemble des caractères qui interviennent soit, pour favoriser l'accumulation des sels ou pour faciliter leur lessivage, les irrégularités de la courbe indiquent une hétérogénéité dans le sol, soit une discontinuité lithologique, ou des limites nettes quand elles existent entre les horizons pédologiques, c'est le cas du niveau sableux piégé entre les horizons argileux ou un dépôt limoneux sur un sol argileux ou des horizons à forte différenciation structurale comme 17 A. Dans les courbes irrégulières, les limites sont diffuses et nous les différencions par l'aplanissements des maximums.

Un maximum pointu indique un horizon d'accumulation des sels d'épaisseur réduite et de concentration de sels inférieure par rapport à un maximum aplati qui montre une forte concentration en sels et d'épaisseur assez grande.

Cette représentation permet aussi de suivre l'évolution du front de déplacement de la salure dans le temps pour un point de mesure donné.

Pour un même type de sol, et pour un même niveau de la nappe, et si les courbes ont la même allure mais de conductivité différente comme les 2 séries de SOUKRA, il y a un autre facteur qui intervient qui ne peut être que l'apport culture.

Donc la représentation verticale peut nous renseigner sur les salures du profil et les paramètres qui sont liés à cette salure.

La représentation horizontale à l'avantage de comparer plusieurs profils entre eux et de voir l'évolution horizontale mais approchée, soit dans le temps ou dans l'espace pour une tranche de sol donnée.

Elle permet de voir une évolution verticale mais c'est plus difficile car il faut superposer les calques, pour avoir une idée verticale et horizontale de la salure.

Elle permet de délimiter les grandes tâches de conductivité au terrain, avec leur extension. La représentation horizontale complétée avec les coupes donnent des renseignements assez intéressants.

Enfin la représentation horizontale nous a permis de choisir des profils selon les tâches délimitées, malgré une faible différenciation pédologique, et la représentation verticale va de pair avec la morphologie du profil qui est conditionnée par le facteur de pédogenèse important qui est la salure.

DEUXIEME PARTIE

III - ETUDE DES RELATIONS ENTRE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DE L'EXTRAIT SATURE (ECe) ET LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE APPARENTE (ECa) - ETALONNAGE D'ECa

Nous avons discuté de quelques résultats de la conductivité électrique apparente, mesurée sur le terrain, il reste à comparer ces valeurs d'ECa avec la conductivité électrique de l'extrait saturé mesuré au laboratoire (ECe). Dans ce but nous avons procédé par deux méthodes :

La première consiste à prélever à la tarière des échantillons de 20 en 20 cm jusqu'au 100 cm à différentes périodes de l'année et à différentes humidités, puis on compare ECa/ECe.

Dans la deuxième on sature un volume de terre donné par différentes doses d'eau à des concentrations variées de sels et on suit la variation d'ECa et d'ECe.

A - ETALONNAGE A LA TARIERE

Les échantillons ont été prélevés dans les trois sites de sols variés :

1. - Site SOUKRA : Sols salés sableux

La conductivité électrique de l'extrait saturé (ECe) varie de 1-12 mmhos/cm à partir d'une certaine profondeur, il était difficile de faire des prélèvements à la tarière car au-dessous du niveau de la nappe, le sable coule avec l'eau.

Les conductivités apparentes et vraies sont fortement corrélées (figure n° 17)

$$ECe = 4,8 ECa + 1,27$$

$$r = 0,978$$

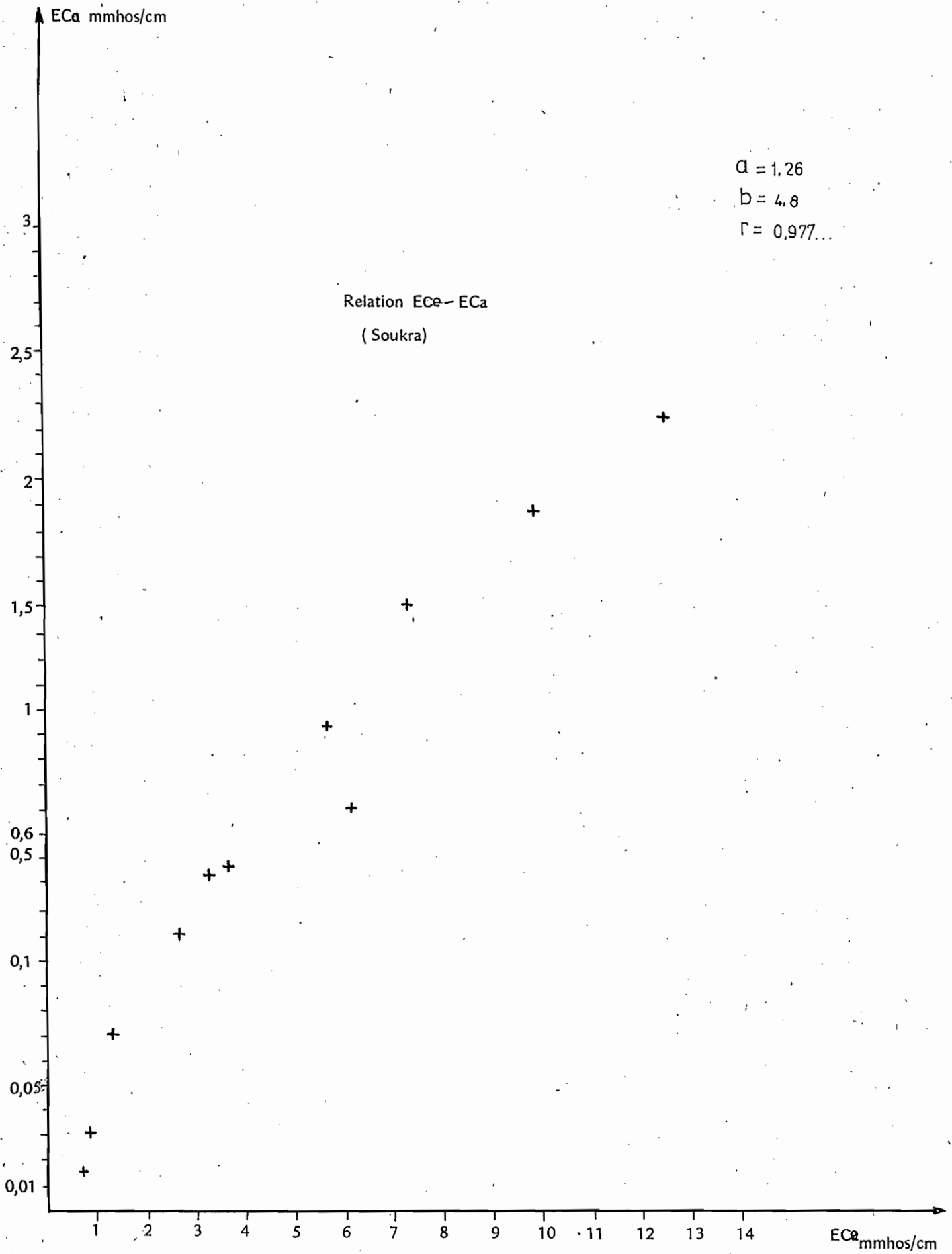
2. - Site d'EL HABIBIA : Sols salés argileux

Soixante échantillons ont été prélevés dans ce site à différentes périodes de l'année.

La conductivité électrique de l'extrait saturé varie de 2 à 23 mmhos/cm, et celle de la conductivité apparente de 1 à 12 mmhos/cm.

Cependant, il existe une relation lâche entre ECa-ECe pour les 60 couples.

Figure 17



Le coefficient de corrélation est :

$$r = 0,6308 \dots \text{ pour la sonde (verticale)}$$

$$\text{et } r = 0,4312 \dots \text{ pour la méthode Wenner.}$$

ce qui nous amène à examiner les paramètres qui interviennent dans la variation d'ECa, autre, que la salure, ou, en relation avec cette dernière, et dans quelle mesure nous pouvons améliorer la relation ECe - ECa.

a₁ - Les facteurs de variation d'ECa (amélioration du rapport ECe/ECa)

La résistivité apparente globale d'un sol est la somme de la résistivité de ses phases qui le constituent (liquide, solide ...) de même pour la conductivité électrique apparente.

$$\text{On a : } \text{ECa} = f(T, \text{EC}_w, \theta, \text{EC}_s)$$

EC_w = conductivité électrique de la solution du sol

T = tortuosité ou "porosité" (coefficient de transmission)

θ = volume d'eau dans le sol

EC_s = conductivité électrique des surfaces d'échanges

Les deux variables EC_s et θ sont spécifiques pour chaque type de sol, dans certaines mesures elles sont constantes.

Pour un sol salé, où le sodium n'est pas fixé définitivement sur le complexe absorbant, il est mobile et il passe facilement dans la solution du sol, dans ce cas l' EC_s est faible (nous y reviendrons en détail dans le cas des sols alcalins).

La tortuosité ou le coefficient de transmission "T" est en relation avec le volume d'eau, pour un même sol on a : $T = a\theta + b$.

Si " θ " est constant, c'est-à-dire si nous mesurons toujours la conductivité électrique apparente à la capacité au champ par exemple, T sera aussi une constante, et la formule précédente devient :

$$\text{ECa} = f(\text{EC}_w)_{\theta, T, \text{EC}_s}$$

et comme EC_w est une mesure de la conductivité électrique de la solution du sol, nous pouvons remplacer l' EC_w par l'ECe (conductivité électrique de l'extrait saturé).

$$\text{ECa} = f(\text{ECe})_{\theta, T, \text{EC}_s}$$

Dans notre cas, la variable θ , n'est pas constante puisque les prélèvements étaient étalés au cours de l'année, les uns quand le sol était à sa capacité au champ, les autres au-dessous du point de flétrissement ou à saturation.

De même quand nous substituons la conductivité électrique de la solution du sol (EC_w) par la conductivité électrique, de l'extrait saturé EC_e , ce n'est qu'un cas particulier de l'état de sels dans le sol, où nous supposons que tous les sels sont dissous dans la solution du sol. Alors qu'en réalité à partir d'un certain taux d'humidité dans le sol, les sels se cristallisent et ils passent de l'état "liquide" (sels dissous dans l'eau) à l'état solide, et la conductivité électrique apparente n'est pas la même dans les deux phases. Par contre au laboratoire nous dissolvons tous les sels dans l'eau quand nous mesurons EC_e .

Tous ces paramètres vont intervenir dans la mesure d' E_{Ca} sur terrain.

a₂ - Relation entre le rapport EC_e/EC_a et θ (Pourcentage d'eau)

Le rapport EC_e/EC_a prend différentes valeurs (0,6 à 25) selon le pourcentage d'eau (tableau n° 13).

Nous pouvons envisager trois cas d'eau dans le sol (figure n° 18) :

- le sol à faible pourcentage d'eau ($\% H \ll$ capacité au champ)
- le sol à capacité au champ
- le sol à saturation ($\% H \gg$ à la capacité au champ).

a₂₁ - Le sol à faible pourcentage d'eau :

Un faible pourcentage d'eau dans un sol influe sur la mesure d' E_{Ca} de deux façons : Dans le premier cas, d'une part le sol est sec ($\% \text{ eau} < 8 \%$), fissuré, la phase gazeuse augmente au détriment de la phase liquide, le contact entre les électrodes et le sol est mauvais. D'autre part, à partir d'un certain pourcentage d'eau, les sels se cristallisent ils se comportent comme un solide et ils participent moins à la transmission du courant que s'ils sont dissous dans la solution du sol. Par conséquent la résistance est grande, elle est due en partie à l'air dans les pores, et les fissures, et parallèlement la conductivité électrique apparente (E_{Ca} sera faible, ce qui est le cas de la plupart des échantillons de surface de 0 - 20 cm.

Figure 18

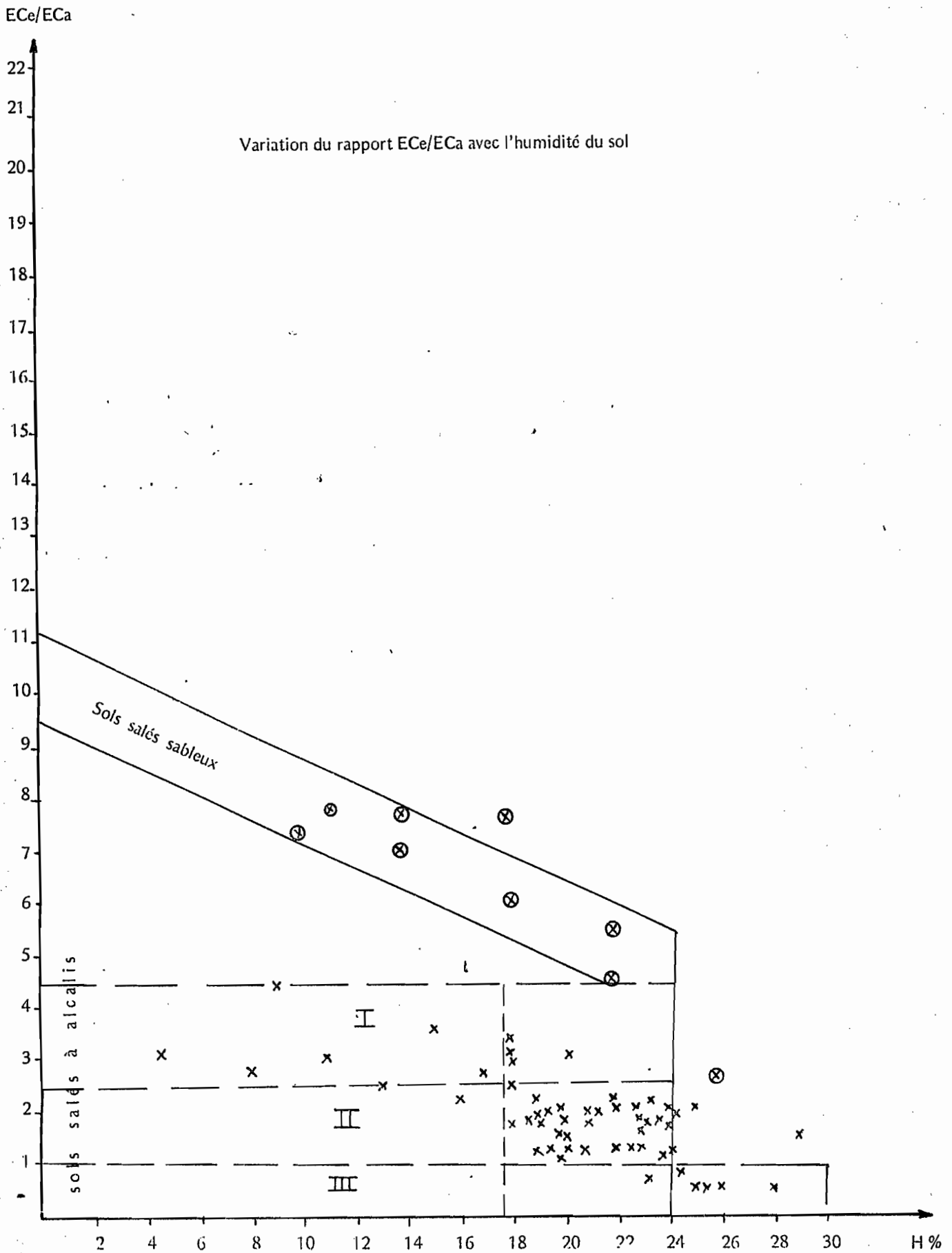


Tableau n° 13 - Variation du rapport (ECe/ECa) dans différents sols
avec le pourcentage d'humidité (H%)

EL HABIBIA	24A		37A		27		4	
Profondeur	ECe/ECa	% H	ECe/ECa	% H	ECe/ECa	% H	ECe/ECa	% H
0 - 20	3,22	17,8	25,25	14,4	1,61	29,5	3,47	15,1
20 - 40	3,08	20,6	2,95	18,1	0,52	25,1	2,03	19,3
40 - 60	2,09	22,8	1,97	21,15	0,58	28,1	1,72	17,9
60 - 80	1,96	23,3	1,36	23,6	0,60	24,9	2,38	16,3
80 - 100	1,25	22,1	1,44	23,8	0,77	25,9	4,18	21,7

EL HABIBIA	31		3		8		25		32		35	
Profondeur	ECe/ ECa	% H	ECe/ ECa	% H	ECe/ ECa	% H	ECe/ ECa	% H	ECe/ ECa	% H	ECe/ ECa	% H
0 - 20	1,89	23,7	2,7	8,35	3,2	4,8	10,27	6,8	2,23	23,6	7,37	10,2
20 - 40	2,19	23,5	1,77	19,2	3,04	11,2	4,38	8,9	2,08	24,6	2,62	13,13
40 - 60	2,18	21,4	1,20	21,1	2,68	17,4	2,48	18,6	1,13	23,8	2,06	19,26
60 - 80	1,36	24,4	1,20	19,4	1,96	20,3	1,91	21,3	0,97	23,2	1,16	20,03
80 - 100	0,70	29	1,09	24,6	1,55	20,3	1,28	20,4	0,97	23	1,24	17,7

SOUKRA	6 A		11 A		1 A		Sol alcalin MATEUR			
							2B		3B	
Profondeur	ECe/ ECa	% H	ECe/ ECa	% H	ECe/ ECa	% H	ECe/ ECa	% H	ECe/ ECa	% H
0 - 20	7,87	15,23			47	4,00		18,5		19
20 - 40	5,56	20,00	8,13	14,05	32,14	5,6		22		18
40 - 60		23,35	4,77	22,8	23,64	8,6		23,05		20
60 - 80			2,50	26,7	6,9	17,32		25,20		20
80 - 100								25,55		

Dans le deuxième cas, le contact entre les électrodes et le sol est bon ($8 \% \leq \% H \leq 15 \%$), mais l'eau de la solution du sol est insuffisante pour dissoudre les sels ou pour réaliser au moins un lien entre les cristaux, pour que le courant passe dans tous les cristaux de sels, ce qui est le cas des horizons d'accumulation des sels sous forme de tâches sur les faces des agrégats ou sur les parois des vides, (soit en surface 0-20 cm ou en profondeur).

Le rapport E_{Ce}/E_{Ca} pour un sol salé à faible pourcentage d'eau ou à un pourcentage insuffisant est toujours supérieur à 3, dans les sols argileux d'EL HABIBIA.

$$3 \leq E_{Ce}/E_{Ca} \leq 25$$

Pour un sol salé sableux de SOUKRA, ce rapport est supérieur à 11.

a₂₂ - Sols à la capacité au champ

La plupart des échantillons des sols salés ou à alcalis (Site : EL HABIBIA et MATEUR) ont un pourcentage d'eau voisin de la capacité au champ (18 à 24 % d'eau) pour un pourcentage d'argile de 40 à 50 %.

$$1 \leq E_{Ce}/E_{Ca} \leq 2,5$$

a₂₃ - Sols à saturation

Quand le sol est à saturation l'eau dissout le maximum d'électrolytes, parfois la sonde s'enfonce sous son propre poids, ainsi quelques échantillons ont un pourcentage d'eau supérieur à 25 % ($25 \% \leq \% H \leq 30\%$), le rapport E_{Ce}/E_{Ca} est très faible

$$0,5 \leq E_{Ce}/E_{Ca} \leq 1$$

La figure n° 18 montre ces trois états d'humectation du sol salé argileux.

Pour le sol salé sableux, le rapport E_{Ce}/E_{Ca} semble avoir une relation linéaire plus forte avec le pourcentage d'eau que les sols salés à alcalis argileux.

D'après la même figure citée ci-dessus, nous avons choisi 40 couples dans le sol salé d'EL HABIBIA parmi 60 qui ont un pourcentage d'eau voisin de la capacité au champ. Ils sont largement représentatifs pour un traitement statistique et la variable "θ" y est plus ou moins constante. Ce qui nous a donné une conductivité électrique de l'extrait

saturé (E_{Ce}) assez fortement liée à la conductivité électrique apparente (E_{Ca}).

$$E_{Ce} = 2,15 E_{Ca} - 1,3$$

$$r = 0,897$$

Donc la relation est nettement améliorée entre E_{Ca} et E_{Ce} , en éliminant les échantillons qui ont un pourcentage d'eau trop élevé ou insuffisant.

Un excès d'eau a l'avantage de faire dissoudre tous les sels, et l' E_{Ca} mesurée s'approche de la mesure de la solution du sol au laboratoire, mais cet état de sol saturé dans la nature est limitée à une période réduite dans les pays arides ou semi-arides, et souvent le terrain ne se prête pas pour le travail. Un manque d'eau, les mesures sont erronées, cela est dû à un mauvais contact ou à une cristallisation de sels.

Quand le sol est à la capacité au champ, c'est pratique pour les mesures d' E_{Ca} , surtout dans les périmètres irrigués après les irrigations et le ressuyage du sol. C'est pour ces raisons que nous avons choisi les échantillons qui ont un pourcentage d'eau voisin de la capacité au champ.

3. - Site de MATEUR : Sols alcalins argileux

Pour les sols alcalins de Mateur, nous avons un sol à la capacité au champ, le coefficient de corrélation est du même ordre que celui des sols salés d'EL HABIBIA.

$$E_{Ce} = 1,34 E_{Ca} + 14,45$$

$$r = 0,92$$

Si nous examinons les trois courbes d' E_{Ce} en fonction d' E_{Ca} pour les trois sites: SOUKRA (sols salés sableux), EL HABIBIA (sols salés argileux) et MATEUR (sols alcalins argileux) nous avons la pente de la courbe :

$$\text{SOUKRA} - E_{Ce} = 4,8 E_{Ca} + 1,27$$

$$\text{EL HABIBIA} - E_{Ce} = 2,15 E_{Ca} - 1,3$$

$$\text{MATEUR} - E_{Ce} = 1,34 E_{Ca} + 14,45$$

qui diminue d'un type de sol à l'autre, et l'ordonnée à l'origine surtout pour les sols alcalins qui est élevé.

Dans les sols salés nous avons supposé que la variable EC_s (EC_s , c'est la conductivité électrique due aux surfaces d'échange) d' E_{Ca} est négligeable du fait que le sodium du complexe absorbant est mobile et il passe facilement dans la

solution du sol, l'ordonnée à l'origine de la courbe $EC_e = f(EC_a)$ est faible (positif ou négatif). Dans les sols alcalins, nous avons une forte proportion de sodium fixé sur le complexe absorbant et l' EC_s n'est pas négligeable et on a :

$$EC_a = f (EC_w, EC_s)_{T, \theta}$$

La valeur d' EC_s est estimée égale à peu près à 15 dans le sol alcalin du site de Mateur (ordonnée à l'origine).

Examinons l'état du complexe (tableau n° 14) absorbant pour chaque type de sol en calculant le SAR et le rapport chlorures sur sulfates.

Dans le sol salé argileux du site d'EL HABIBIA la valeur du SAR varie entre 6 et 20 et le rapport Cl^-/SO_4^{--} de 1 à 2.

Dans le sol salé sableux, le SAR et Cl^-/SO_4^{--} est à peu près le même dans les horizons où l'influence de la nappe existe.

Par contre dans le sol alcalin du site de MATEUR, nous constatons des valeurs élevées de SAR, entre 25 et 79, et les chlorures dominant très largement les sulfates avec un rapport Cl^-/SO_4^{--} compris entre 8 et 22.

Donc la conductivité électrique des surfaces d'échange (EC_s) est plus importante dans le sol alcalin que dans les sols salés, et de ce fait elle n'est pas négligeable dans la mesure d' EC_a sur terrain pour les sols alcalins.

Tableau n° 14 - Variation du SAR et Cl^-/SO_4^{--} pour les trois types de sols

Prof.	S O L S						S A L E S		A R G I L E U X					
	24 A		37 A		20		27		4		31		3	
	SAR	Cl^- / SO_4^{--}	SAR	Cl^- / SO_4^{--}	SAR	Cl^- / SO_4^{--}	SAR	Cl^- / SO_4^{--}	SAR	Cl^- / SO_4^{--}	SAR	Cl^- / SO_4^{--}	SAR	Cl^- / SO_4^{--}
0 - 20	7,08	1,03	11,54	1,12	10,4	1,01	10,25	1,25	16,05	1,6	18,41	1,12	16,37	1,6
20 - 40	14,75	1,00	13,11	1,37	15,8	1,57	17,2	2,41	19,90	2,11	26,9	1,60	18,11	2,25
40 - 60	17,76	1,55	13,08	1,37	16,55	1,69	19,45	3,61	19,91	1,47	35,37	3,50	12,41	1,68
60 - 80	16,74	0,93	14,07	1,95	14,57	1,93	10,93	0,9	20,22	2,87	19,05	3,05	8,52	2,37
80 - 100	7,24	1,32	6,56	6,77	8,94	1,21	15,02	2,00	16,86	1,41	13,2	2,6	6,78	1,2

Prof.	S O L S S A L E S A R G I L E U X						S O L S S A L E S S A B L E U X				S O L S A L C A L I N S			
	8		11		35		11A		1A		2B			
	SAR	Cl^- / SO_4^{--}	SAR	Cl^- / SO_4^{--}	SAR	Cl^- / SO_4^{--}	SAR	Cl^- / SO_4^{--}	SAR	Cl^- / SO_4^{--}	SAR	Cl^- / SO_4^{--}	SAR	Cl^- / SO_4^{--}
0 - 20	6,40	1,3	14,26	1,35			18,8	1,78			24,25	7,73	79,5	11,20
20 - 40	19,8	1,37	18,4	1,88	18,46	1,93	16,17	2,18			27,8	12,45	90,0	21,5
40 - 60	15,8	1,55	9,42	2,15	17,95	1,03	20,27	2,22	5,9	1,32	26,66	22,19	57,5	13,80
60 - 80	14,7	2,16	9,75	1,66	13,2	2,25			11,8	1,12	32,47	18,75	71,11	9,78
80 - 100	12,8	2,05			12,7	2,08					29,1	13,51		

B - ETALONNAGE A SATURATION

Dans la première étape, l'étalonnage de la sonde a été fait au laboratoire pour déterminer la constante de la cellule, puis nous avons comparé les conductivités apparentes aux conductivités vraies mesurées au laboratoire sur les échantillons prélevés à la tarière à différentes humidités et à des périodes différentes de l'année.

Le but de l'étalonnage à saturation, c'est d'essayer d'éliminer ou de rendre constant les variables d'E_{Ca} sur terrain tel que le pourcentage d'eau "θ" ; et d'essayer de mesurer la conductivité électrique propre à la solution du sol, en procédant de deux manières :

Les profils qui ont une accumulation de sels visibles en surface sous forme d'efflorescences on les arrose avec de l'eau douce à différentes doses et on suit la descente du front de salinité. Dans un profil à très faible conductivité on cherche à avoir une conductivité minimale, qui sera constante avec le passage d'un certain volume d'eau.

Dans l'autre cas, nous procédons de la même façon avec de l'eau à différentes concentrations de sels (2/3 de NaCl et 1/3 de CaCl₂) dans les deux types de profils. Dans un sol peu salé pour déceler l'augmentation de la salure de la solution et dans quelle proportion par rapport à sa salure initiale, et dans les profils salés pour vérifier l'accroissement de la conductivité avec les taux de sels.

Le principe, c'est d'enfoncer un cylindre de 25 cm de diamètre dans le sol sur 20 cm, pour limiter un volume de sol donné on laisse dans les 15 à 20 cm au-dessus du sol pour maintenir un plan d'eau constant de 5 cm au-dessus de la surface, puis on arrose avec 20 l ou 40 l d'eau douce pour l'essai lessivage, ou 20 l à 5 g, 10 g, 20 g et 30 g de sels par litre.

Après 48 heures, lorsque le sol est ressuyé, on mesure la conductivité électrique apparente de 5 cm en 5 cm jusqu'à 20 cm, puis on prélève et on mesure la conductivité électrique de l'extrait saturé (voir tableau n° 15).

Tableau n° 15 -

N° Profil	ECa	ECa	ECe initiale	pH	Concentration de sels en g/l
24 A	1,35	0,9	2,5	8,4	40 l d'eau douce
	1,7	0,9		8,5	20 l
	3	4,9		8,2	5 g/l
	3,8	5,0		8,1	10 g/l
	5,6	11,5		8,1	20 g/l
	6,8	12,7		8,2	30 g/l
15	3,65	6,1	15	8	20 l d'eau douce
	34	5		8,1	40 l d'eau douce
8	0,7	0,9	0,9	8,4	20 l d'eau douce
	3,8	6		8,2	5 g/l
	2,93	6,5		8,2	20 g/l

Les essais ont été faits sur la tranche de 20 cm des profils 15, 24 A et 8, qui étaient présentés dans la première partie.

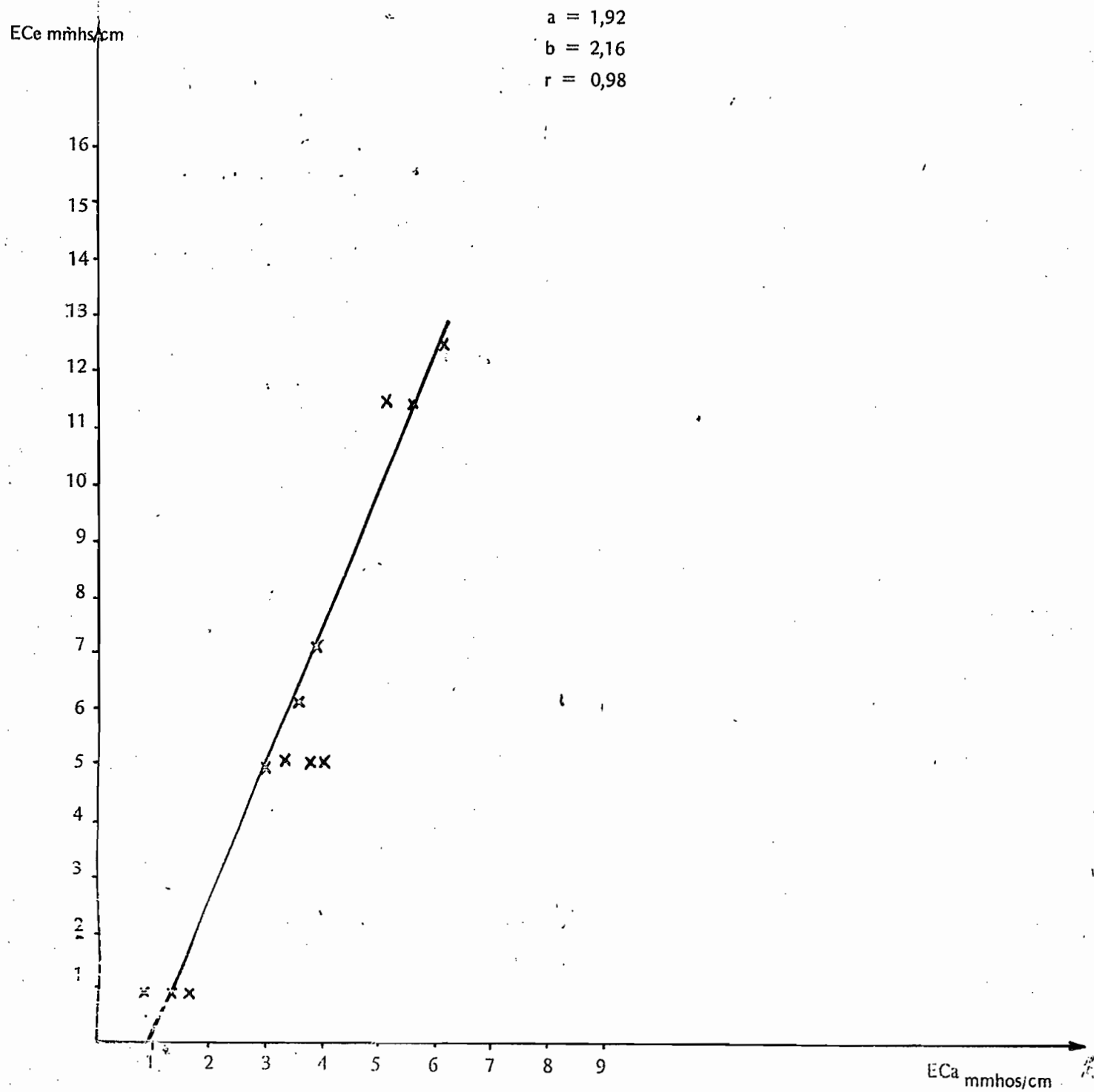
Le profil 15 a une accumulation de sels sous forme d'efflorescences en surface et des tâches dans les 0-20 cm, le sol est peu perméable (et correspond à une microdépression). Le pH n'a pas varié, la conductivité électrique de l'extrait saturé initial est de 15 mmhos, elle a chuté avec 20 l d'eau douce à 6,1 puis d'une unité avec 40 l.

Le profil 24 A est argileux comme le 15, mais perméable en surface (20 cm), le sol est moins salé, l'eau de pluie arrive à s'infiltrer facilement au moins en surface. La conductivité électrique de l'extrait saturé initial est de 2,5, en le lessivant à 20 ou 40 l, la conductivité prend sa valeur minimale de 0,9 mmhos, puis augmente avec les différentes concentrations de sels, mais il semble que l'ECe ne varie pas avec les petites différences de concentration, par exemple avec 5 g et 10 g l'ECe est presque le même, de même pour 20 g et 30 g, alors qu'elle augmente de 4,9 à 12,7 de 5 g/l à 30 g/l.

Nous constatons aussi qu'à partir de 20 g/l, l'ECe croît lentement.

Figure 19

Etalonnage à saturation
(relation $EC_e - EC_a$)



Dans le profil n° 8, la tranche de 20 cm correspond à un sol limono-argileux, perméable, de conductivité électrique initiale de 0,9 mmhos/cm, qui en arrosant avec 20 l d'eau douce n'a pas changé, alors qu'avec 5 g/l elle a marqué un saut de 0,9 à 6 mmhos/cm, et avec 20 g/l l'accroissement est très faible et presque constant.

Donc d'après ces essais au terrain, nous pouvons dire, que dans un sol salé comme le profil 15 à salure acquise, une quantité convenable d'eau douce suffira pour lessiver le maximum de sels solubles au moins la tranche de 20 à 30 cm supérieurs, ce que nous constatons après les pluies à condition qu'il n'y ait pas d'apport latéral (cas du 15 avec apport latéral); mais à partir d'une certaine dose d'eau, la salure ne diminue plus que très lentement, à l'opposé quand on arrose un sol à faible salure avec de l'eau chargée en sels, le sol acquiert une salure plus vite et puis on a un accroissement faible. Dans les deux cas nous avons un palier (voir schéma ci-dessous).

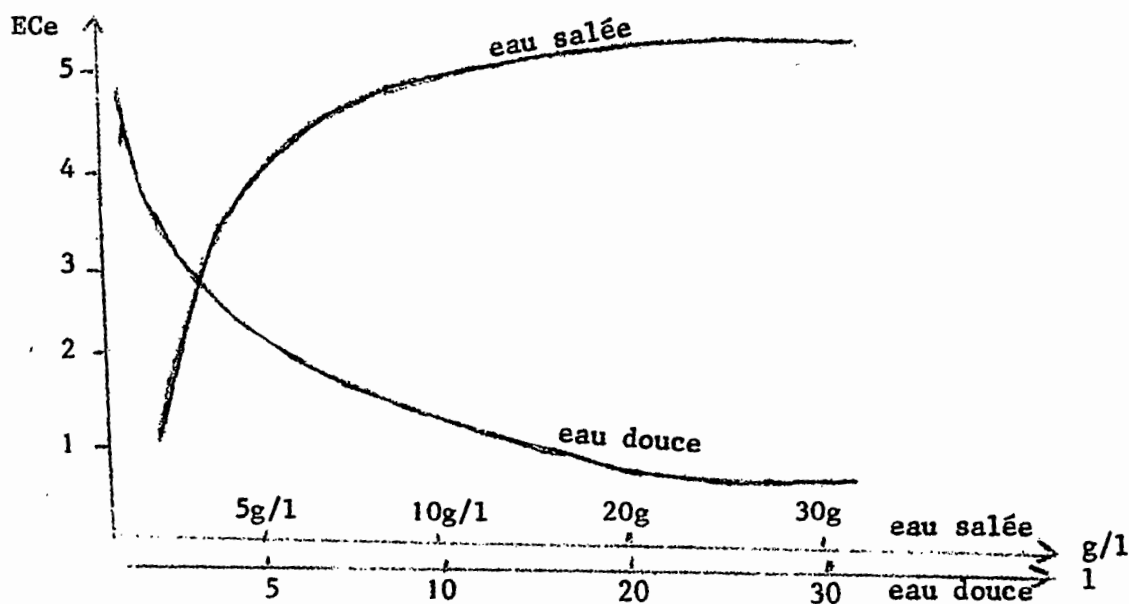


Schéma de variation de ECe avec arrosage à l'eau douce et à l'eau salée

La conductivité électrique apparente d'un sol est fonction de sa composition granulométrique. La figure n° 22 montre une forte relation entre l'ECe/ECa.

$$ECe = 2,16 ECa - 1,92$$

$$r = 0,98$$

TROISIEME PARTIE

IV - RELATION ECa ET TENEUR EN SELS

Après avoir étalonné la méthode verticale de deux façons différentes, nous avons essayé de chercher les relations qui peuvent exister entre le rapport E_{Ce}/E_{Ca} et les autres variables afin de calculer le pourcentage en sels.

A - CALCULS

Nous savons que la conductivité d'un sol est étroitement liée au pourcentage d'éléments fins d'un sol, et en particulier la fraction inférieure à 2μ . Nous n'avons pas une relation directe entre le rapport E_{Ce}/E_{Ca} et le pourcentage d'argile, mais comme le pourcentage de saturation (S.P.) et le pourcentage d'argile sont fortement liés (figure n° 20), nous avons une bonne relation entre E_{Ce}/E_{Ca} et SP (figure n° 21).

$$SP = 1,05 A + 27,81$$

$$r = 0,92$$

SP = Pourcentage de saturation

A = argile en %

$$E_{Ce}/E_{Ca} = - 0,045 (SP) + 5,54$$

$$r = 0,82$$

Ce qui prouve que la fraction fine (argile) joue un rôle important dans les réserves en eau et par là la solution du sol. Un sol argileux acquiert une salure plus vite qu'un sol sableux.

Puisque le S.P. est l'image du type granulométrique d'un sol, il existe une relation entre la teneur en sels, E_{Ce} et SP.

$$\text{Teneur en sels \%} = \frac{E_{Ce} \times 0,064 \text{ SP}}{100} = f(E_{Ca})$$

Cette formule nous permet de calculer la teneur en sels approchée, connaissant la conductivité électrique de l'extrait saturé et le pourcentage de saturation.

Suite à ces ensembles de relations cités ci-dessus, il est possible d'utiliser la conductivité électrique apparente (E_{Ca}) pour le calcul de la teneur en sels, c'est un calcul approché, et le but c'est d'arriver à avoir une relation entre la teneur en sels et la conductivité électrique apparente (figure n° 22).

$$(T.S.C.) \% = 0,1 E_{Ca} - 0,0314$$

$$r = 0,9021 \dots$$

T.S.C. % = Teneur en sels calculés en %

Figure 20 et 21

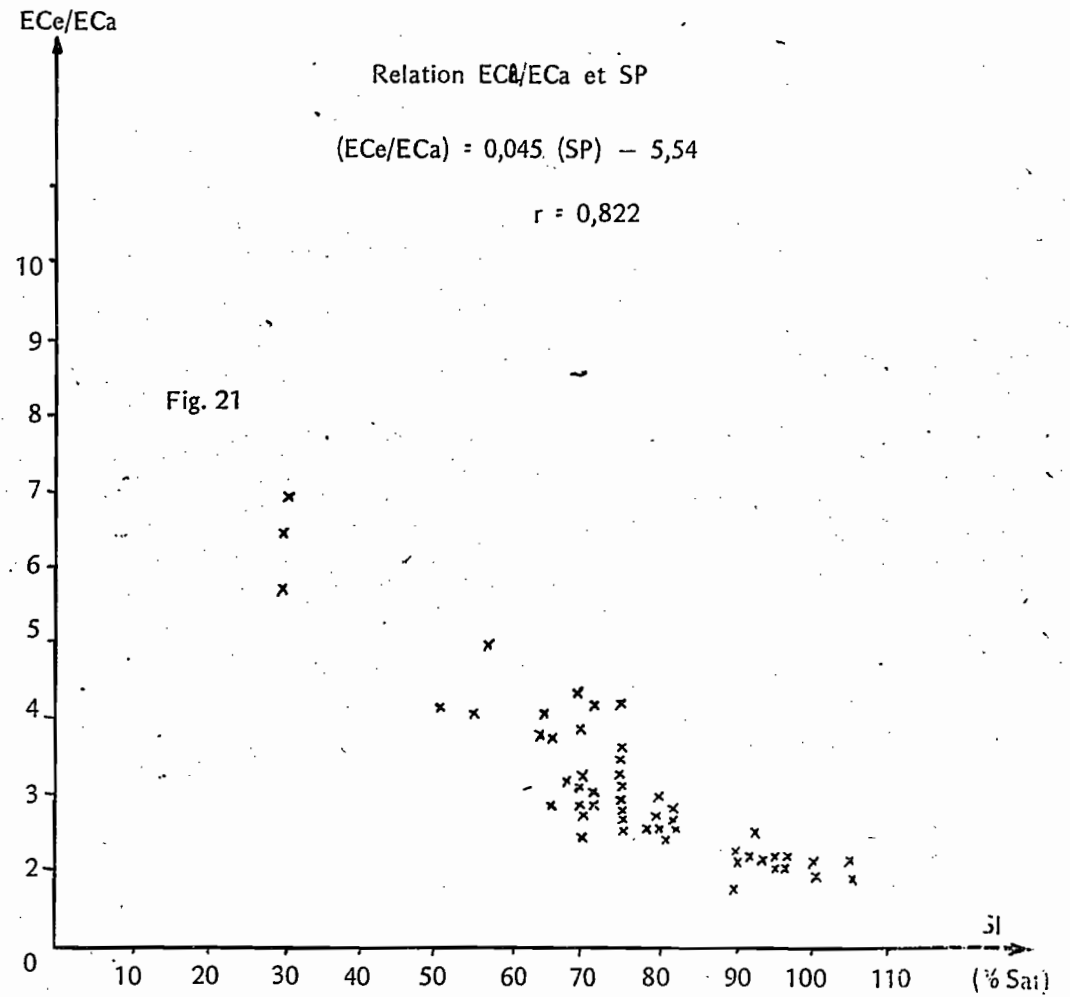
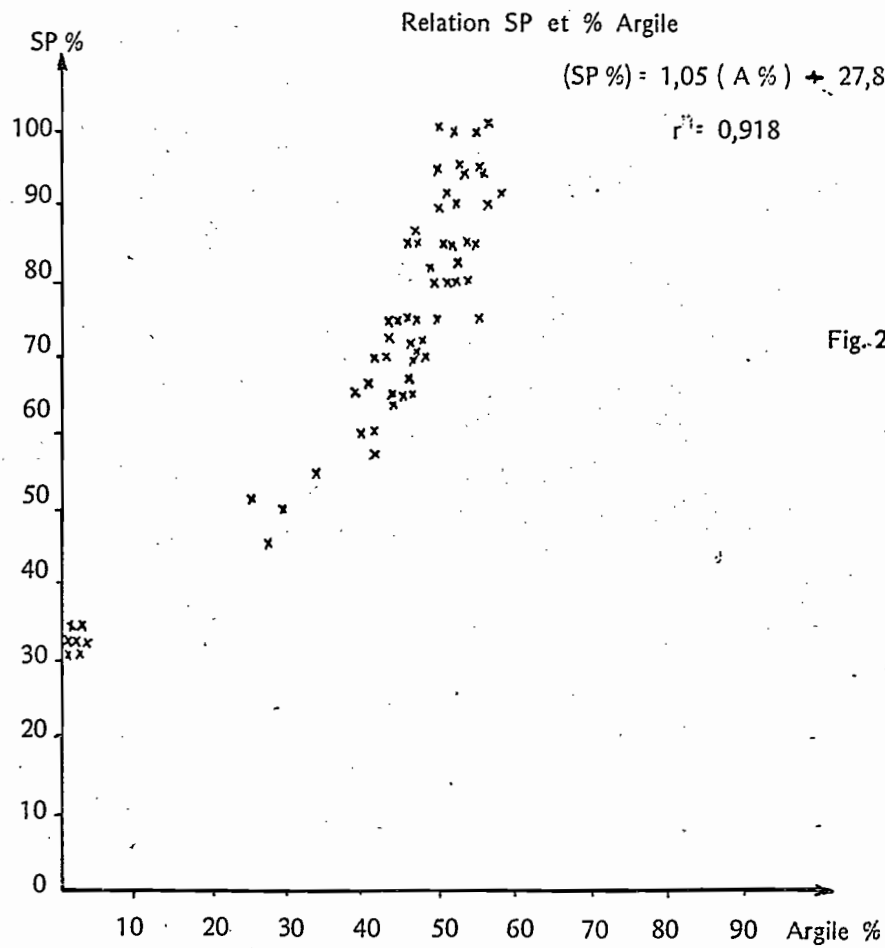
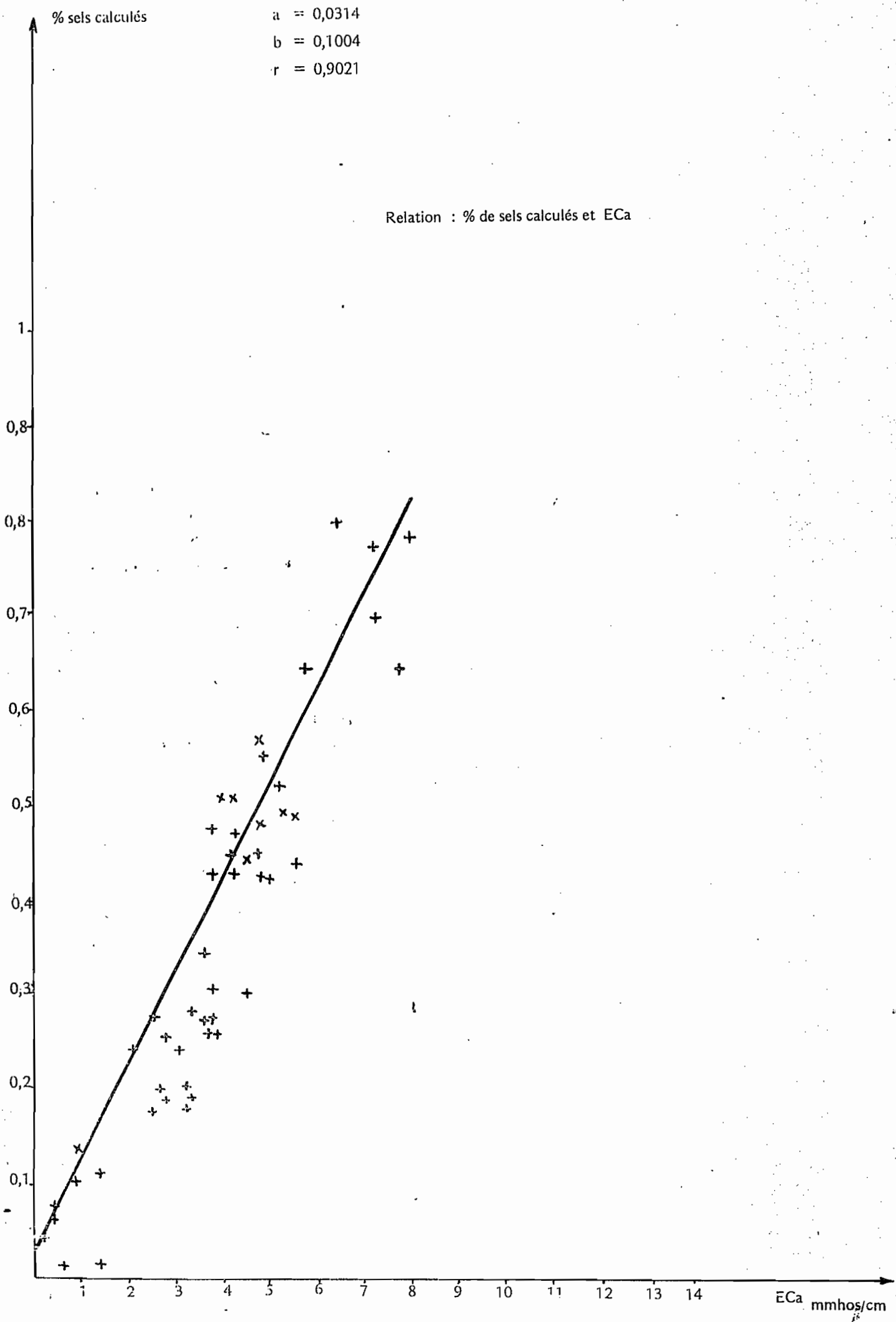


Figure 22



B - RESUTATS

Puisque la teneur en sels calculée d'après la formule citée ci-dessus est fortement liée à la conductivité électrique apparente (ECa), nous avons essayé de dresser une carte de la teneur en sels de la parcelle d'EL HABIBIA de la tranche de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 60-70 et 90-100 cm. (Planches n° 8, 9, 10, 11, 12 et 13).

La tranche 0-20 cm présente une teneur en sels assez faible en général dans l'ensemble de la parcelle, avec des plages isolées à forte teneur en sels. A partir de 20 cm, nous avons une répartition de sels en trois zones : une zone de faible teneur en sel (teneur en sels % < 0,3 %), une zone à teneur en sels supérieure à 0,5 % et enfin une zone intermédiaire.

Parallèlement un schéma des observations morphologiques de surface a été établi et nous distinguons trois zones (schéma n° 2).

1. - La zone I

Elle correspond à un dépôt limoneux avec débris de coquilles en surface, le sol est perméable. Nous n'avons pas d'efflorescence de sels en surface ni de stagnation d'eau.

2. - La zone II

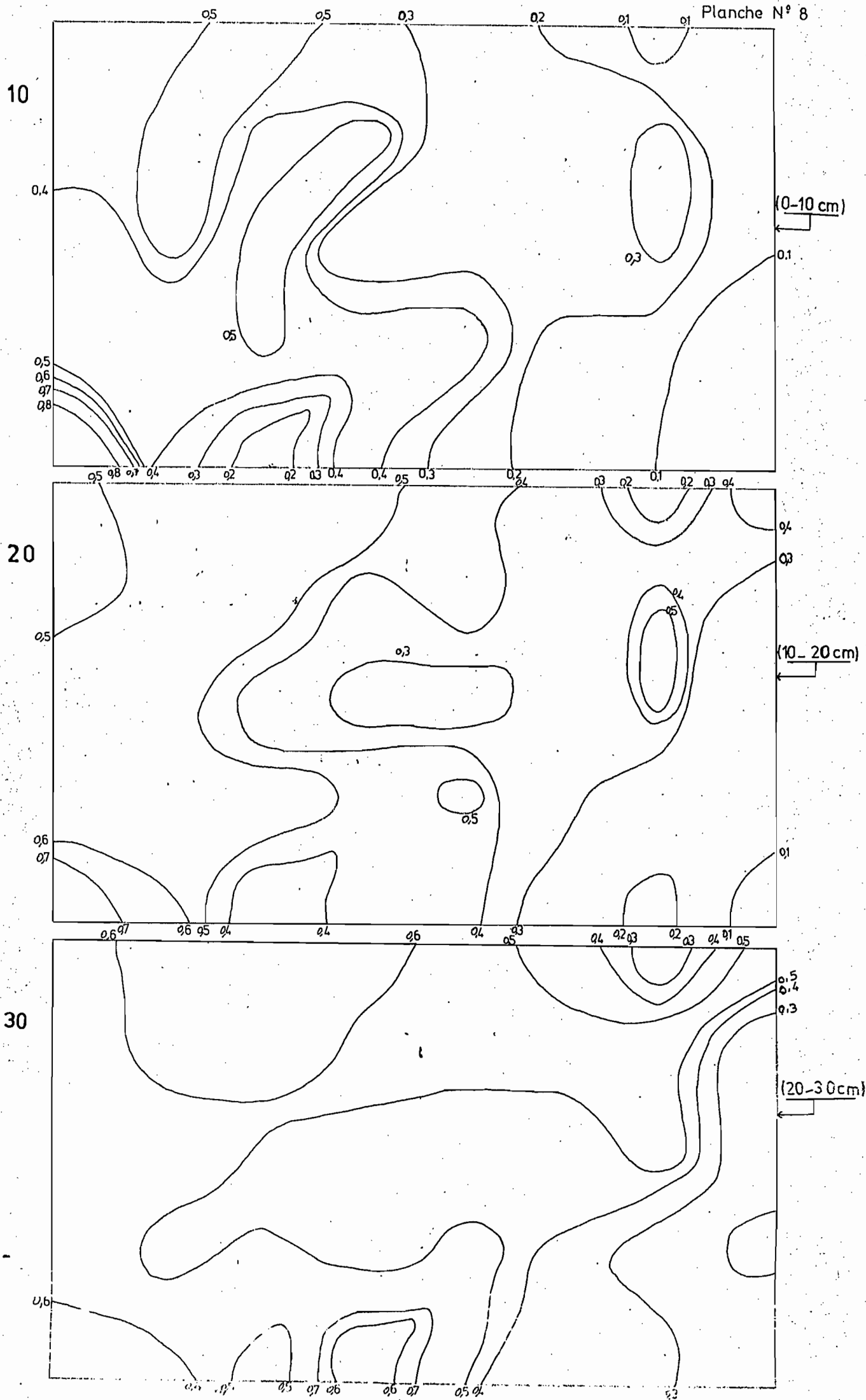
Elle correspond soit à l'ensemble des microdépressions où l'eau stagne avec efflorescence de sels sur les mottes, soit à des efflorescences de sels sans microdépressions mais le sol a une structure "soufflée" en surface.

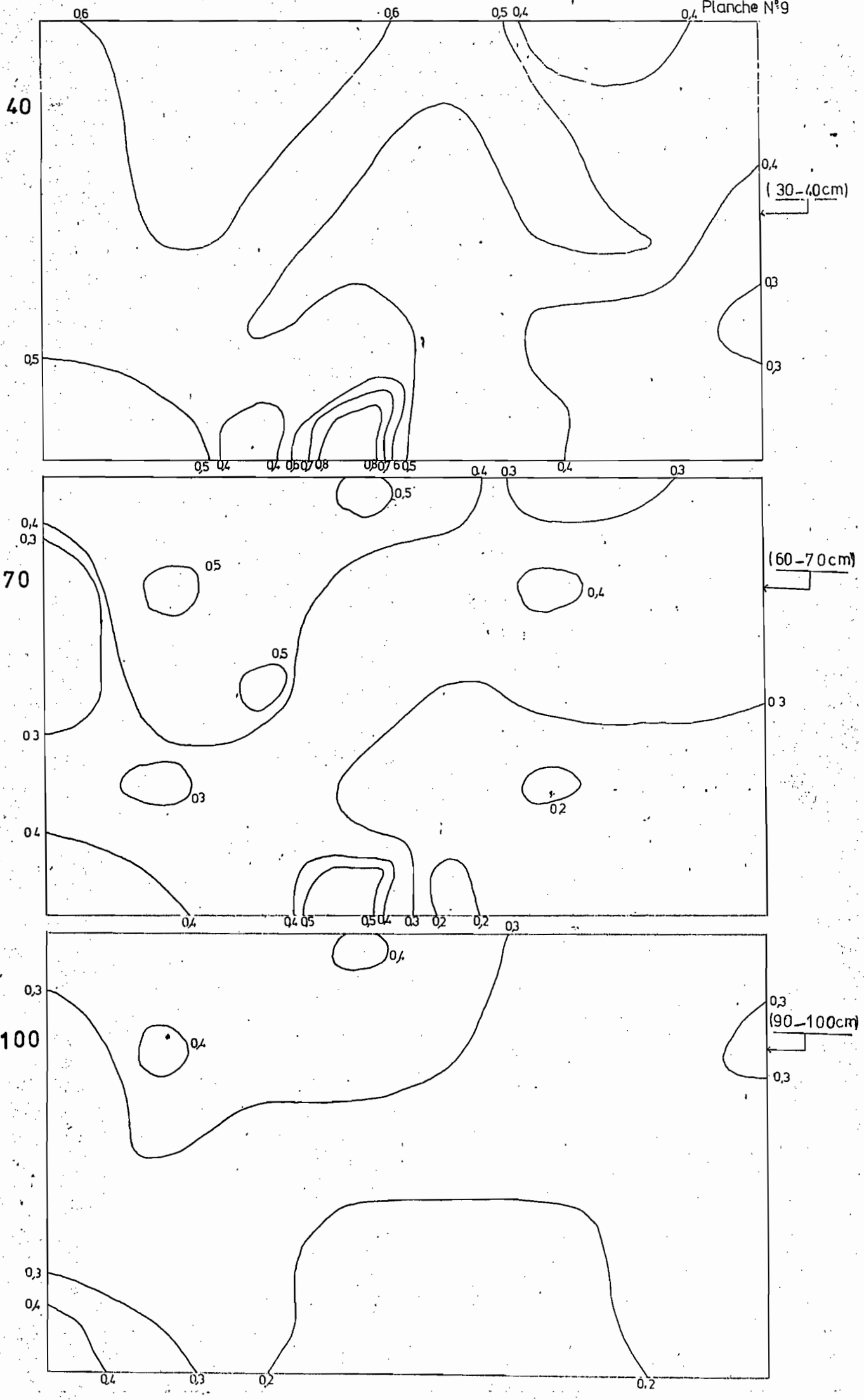
3. - La zone III

C'est une zone intermédiaire entre les deux (voir schéma n° 2).

Si nous comparons la carte des teneurs en sels de la tranche 0-20 cm et le schéma des observations morphologiques de surface, nous constatons qu'il y a une certaine ressemblance entre les deux. La zone à structure soufflée en surface apparaît bien délimitée dans la tranche de 20-30 cm.

La tranche de 20-30 cm montre la disparition des hétérogénéités de surface, avec une augmentation de la teneur en sels en fonction de la





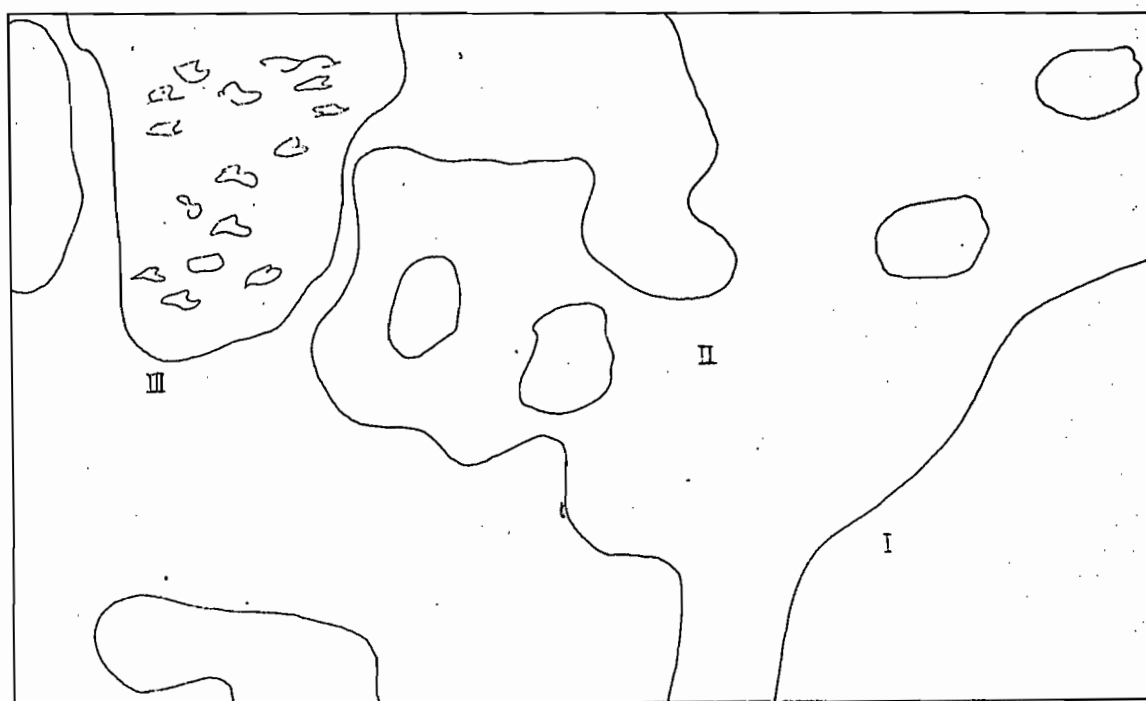
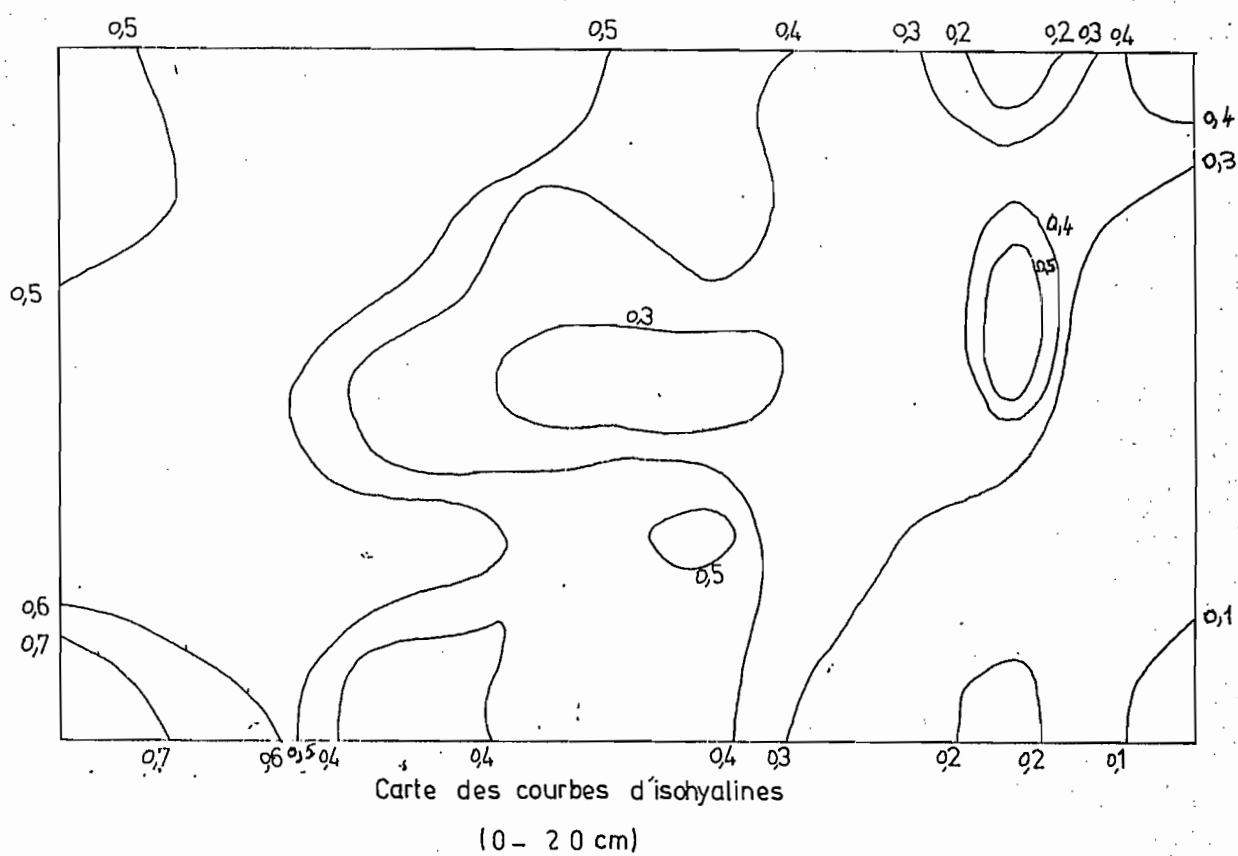


Schéma d'observations morphologiques

Comparaison des observations morphologiques
et des courbes d'isohyales

profondeur avec une certaine répartition dans l'espace.

Pour la tranche de 30-40 cm on constate une nette augmentation de la teneur en sels avec réduction progressive de la zone de faible salure et envahissement de la parcelle par une salure supérieure à 0,5 %.

A 70 cm, la teneur en sels diminue dans l'ensemble de la parcelle et à 100 cm, toute la parcelle à une même salure.

Le but de présenter ces planches de teneur en sels apparente c'est simplement pour donner un exemple de représentation et d'application de la conductivité électrique apparente pour le calcul des teneurs en sels, ce qui nous donne une idée des zones de répartition en sels, plus rapide, si on envisage de traiter ou de contrôler la salure d'un périmètre irrigué ou des sols salés à alcalis en général.

E - DISCUSSION

La teneur en sels calculée à partir des données de la conductivité électrique apparente, n'est qu'une valeur approchée, car pour calculer la relation entre ECa et teneur en sels nous avons auparavant utiliser la formule, Teneur en sels % = $\frac{ECe \times 0,64 \times \% SP}{100}$, le coefficient 0,064 est une valeur moyenne, car pour chaque type de sel a un coefficient propre en plus de l'ECa dépend d'autres variables, des conditions des mesures en fonction de l'humidité...

Donc les données de la teneur en sels apparente nous donnent un schéma général avec toutes les approximations possibles, mais cette manière d'approche a l'avantage d'être rapide et assez proche de la valeur réelle de la teneur en sels.

Mais nous estimons que la conductivité électrique apparente ne représente pas simplement la conductivité électrique de la solution du sol, mais elle mesure l'ensemble des paramètres qui interviennent dans la modification de la salure d'un sol.

Au laboratoire, nous mesurons la conductivité électrique après avoir fait dissoudre l'ensemble des sels solubles, ce qui est rare sur le terrain, car le sol n'est pas toujours à saturation, comme nous l'avons vu avant dans un sol salé sous un climat aride ou semi-aride les sels sont

presque toujours sous forme de deux états : un état solide cristallisé et un état liquide. Les dépôts cristallins présentent un stock de sels certain, mais quand le sol est au-dessous de la capacité au champ, tous les sels ne sont pas sous forme d'électrolytes. C'est comme pour un sol salé sableux et un sol salé argileux, le même taux de sels par exemple dans les deux types de sol n'aura pas les mêmes conséquences sur la mesure de la conductivité. Donc dans notre étude la conductivité électrique apparente dépend largement du taux de sels d'un sol, mais elle mesure aussi les phénomènes de salure d'une façon globale. Cette méthode électrique s'approche plus de la réalité sur terrain que la méthode au laboratoire, par exemple quand nous avons comparé la carte des observations morphologiques de surface avec la carte de salure de 10-20 cm, profondeur qui correspond à l'enracinement de l'orge, nous avons une grande similitude entre les deux et en général les différents stades végétatifs ont été marqués par les phénomènes de salure. L'orge avait un développement normal depuis le semis à la maturation dans la zone à faible salure, dans la zone de forte salure la stagnation d'eau dans les microdépressions et la forte teneur en sels ont influencé la poussée de l'orge, la végétation était clairesemée et les épis sont petits.

Donc cette méthode électrique mesure la salure d'un sol. Elle peut être prise en considération pour classer les sols salés, au moins dans le cadre des aptitudes culturales car elle s'approche plus de la réalité des états de sels dans le terrain que la mesure simplement de la conductivité de la solution du sol. Elle peut aussi nous renseigner sur l'état du complexe absorbant mais globalement.

Le problème majeur de cette méthode c'est de choisir le bon moment où le sol à un taux d'humidité fixe afin d'homogénéiser les données d'ECa. Nous pouvons pallier à cela et surtout dans un périmètre irrigué en effectuant les mesures après l'irrigation et le ressuyage du sol, c'est-à-dire quand le sol est à la capacité au champ. Ceci ne demande pas la connaissance de la carte pédologique si le périmètre présente plusieurs types de sols à vitesse de ressuyage différentes, mais il est préférable de connaître les temps de ressuyage dans le but simplement de mesurer l'ECa à un taux d'humidité voisin de la capacité au champ.

Un autre avantage c'est que cette méthode est rapide et permet d'établir une carte de salure à très grande échelle, dans un temps réduit, à différentes périodes de l'année. Elle permet de suivre l'évolution, le drainage, le contrôle général des sels dans le sol, pour un traitement des sols salés, elle est pratique.

V - CONCLUSION

L'expérimentation de la méthode électrique pour l'étude de la salure du sol demande le choix judicieux de la méthode à utiliser.

Dans un terrain homogène qui ne présente pas des hétérogénéités horizontales, la méthode quadripôle (Wenner) et la méthode verticale (sonde électrique) donnent des résultats satisfaisants, mais ces deux méthodes prospectent des volumes de sol différents. Dans la première méthode le volume prospecté croît progressivement avec la profondeur, tandis que dans la deuxième méthode, le volume est constant.

Cette variation de volume affecte les mesures de la conductivité électrique apparente surtout dans un terrain qui présente des hétérogénéités par endroits tels que l'accumulation préférentielle des sels dans les micro-dépressions, et les nappes perchées ... Les risques d'erreur sont d'autant plus grands, selon que le terrain est hétérogène, ce qui rend la méthode quadripôle inapplicable dans ces conditions et seule la méthode verticale s'est révélée adaptable à ce genre de terrain du fait qu'elle prospecte un volume constant et réduit.

Cependant, l'application de la sonde électrique demande certaines précautions; à savoir, un très bon choix du point de mesure électrique, pour que la mesure soit représentative selon l'échelle à laquelle on prospecte, à moins d'utiliser un quadrillage systématique de la zone à étudier. Le deuxième facteur le plus important dont-il faut tenir compte, ^{c'est} quand nous mesurons la conductivité électrique apparente, nous avons une donnée globale de l'ensemble des paramètres qui interviennent dans la salure du sol et plus particulièrement la solution du sol. Cette solution du sol est variable avec le pourcentage d'eau dans le sol, (au moment de la mesure) ce dernier est en relation étroite avec la nature du matériau qui retient plus ou moins l'eau. Pour rendre l'interprétation facile il est nécessaire d'effectuer les mesures d'ECa dans des conditions semblables, pour un périmètre donné, à un taux d'humidité plus ou moins fixe. Pour pallier à ce problème on a choisi un taux d'humidité tel que le sol s'y maintient pendant une période suffisante au moins pour effectuer une campagne de mesures et que le terrain soit accessible. Dans notre cas la capacité au champ était retenue pour des raisons citées ci-dessus, et en plus dans un périmètre irrigué, après irrigations et ressuyage du sol le taux d'humidité est facile à avoir.

Le but de cette démarche est de rendre constant les variables de la conductivité électrique apparente afin de s'approcher des conditions de mesures au laboratoire. Car, au laboratoire nous mesurons la conductivité de l'extrait saturé après avoir dissout tous les sels. Cet état où tous les sels sont sous forme d'électrolytes est rare dans la nature, sauf pour un sol salé saturé ; par contre la conductivité électrique apparente, nous donne une idée réelle des sels dans le sol, quand un sel est cristallisé il ne se comporte pas de la même façon que s'il est en solution soit vis-à-vis des racines, soit pour la mesure de la conductivité électrique apparente, ce qui fait qu'à partir des données d'ECa nous avons une image globale des facteurs qui interviennent dans la salure. Parmi ces facteurs la nature du matériau ; le profil salin dans un sol salé sableux diffère du profil salin d'un sol salé argileux, qui à son tour diffère du profil salin d'un sol argileux alcalin.

Pour chaque type de sol nous avons une relation propre entre la conductivité électrique apparente et la conductivité électrique de l'extrait saturé. Donc avant d'utiliser la prospection électrique pour détecter la salure d'un sol il est souhaitable de consulter la carte pédologique pour connaître la répartition et le type de sol.

Dans un sol alcalin nous avons les surfaces d'échanges qui interviennent comme variables d'ECa, alors que dans les sols salés, cette variable est négligeable du fait que le sodium passe facilement dans la solution du sol et il n'est pas fixé définitivement sur le complexe absorbant.

L'autre avantage de la méthode, elle permet de déceler les discontinuités de la conductivité si nous avons des discontinuités lithologiques. Elle permet aussi d'avoir une idée de l'amplitude de battement de la nappe ainsi que le niveau de la nappe.

Et comme la méthode est rapide, on peut effectuer un grand nombre de mesures proches et avec la représentation horizontale par des courbes d'isohyales nous aurons une approche de la variation horizontale de la salure et la délimitation plus ou moins précise des zones de différentes conductivités. Elle permet aussi de contrôler la salure dans le temps et dans l'espace ce qui facilite le travail d'aménagement et de contrôles des sols salés.

Enfin, puisque dans un sol salé, le facteur de pédogenèse le plus important c'est les sels, le profil salin nous renseigne sur le profil pédologique dans la délimitation des horizons et la netteté des limites entre eux s'ils existent, sur l'état du complexe absorbant. Donc la conductivité électrique apparente peut être un moyen de diagnostiquer les sols salés pour les aptitudes culturales puisque il existe une relation qui nous permet de calculer la teneur en sels à partir des données de la conductivité électrique.

B I B L I O G R A P H I E

- (1) ARLEY G. FRANKLEN and FRANCIS G. MC LEAN
Bulletin of the association of Engineering Geologists.
Vol. X n° 1 - 1973 - *A test of de Barnes layer Methode of Resistivity Interpretation.*
- (2) BELKHODJA (K.)
Origine, évolution et caractères de la salinité dans les sols de la plaine de KAIROUAN. Contribution à l'étude de leur mise en valeur. (Thèse Docteur Ingénieur - 1970 -).
- (3) BELKHODJA (K.)
Salinité et humidité du sol. Estimation de la salinité de la solution du sol.
Edition D.R.E.S. - 1971 -
- (4) BOULAIN (J.) - 1977 -
Cours d'hydropédologie.
- (5) CHEVERRY (C.)
Exemple d'application des travaux de l'"US Salinity Laboratory" 1963-1968, sur l'alcalinisation de sols soumis à l'action d'eaux bicarbonatées.
Cahiers ORSTOM 1972 Vol. X n° 2.
- (6) CHEVERRY (C.)
Contribution à l'étude pédologique des Polders du Lac Tchad.
Dynamique des sels en milieu continental sub-aride dans des sédiments argileux et organiques.
- (7) CHEVERRY (C.), FROMAGET (M.), BOCQUIER (G.)
Quelques aspects micro-morphologiques de la pédogenèse des sols de polders conquis sur le lac Tchad.
Cahiers ORSTOM Série Pédologie Vol. X n° 4 - 1972
- (8) DANIEL (J.M.) (S.C.E.T.) - 1963 -
Essai d'application de la méthode de prospection électrique.
- (8bis) CHATTAOUI (T.) DUFÉY (J.) LAUDELOUT (H.)
Simulation physique et mathématique du mouvement des sels dans les sols de la Haute-Vallée de la Medjerda de Tunisie.
- 1977 - Ronéo - ORSTOM Tunisie.

- (9) EL IDRISSE (M.)
Diagnostic de la salure des sols par mesures de la résistivité électrique ("In situ").
- (10) A.D. HALVORSON and J.D. RHOADES (SSSAP 38 : 576-581) - 1974
Assessing soil salinity and identifying potential saline-seep areas with field soil resistance measurements.
- (11) A.D. HALVORSON and J.D. RHOADES. (SSSAP - 1976)
Field mapping soil conductivity to delimeate dry land saline-seeps with four electrode technique.
- (12) Manuel de l'Agriculture n° 60 - Département de l'Agriculture des Etats-Unis - Février 1965 -
Caractérisation et amélioration des sols salins et des sols à alcali.
- (13) J.D. RHOADES and R.D. INGVALSON - 1971 - (SSSAP 35 - 54 - 60)
Determining salinity in field soils with resistance measurements.
- (14) J.D. RHOADES FAO Soils Bulletin - 1976 -
Measuring mapping and monitoring field salinity, and water table Depthus with soil resistance measurements.
- (15) J.D. RHOADES and J. VAN SCHILFGARDE (SSSAP - 1976 -)
An electeical conductivity probe for determining soil salinity.
- (16) J.D. RHOADES, M.T. KADAH, A.D. HALVORSON and J.R. PRATHER
Establishing soil electrical conductivity - Salinity calibrations using four electrode cells containing undisturbed soil cores.
Soil Science Vol. 123 - Number 3 - 1977 -
- (17) A.D. HALVORSON, J.D. RHOADES and C.A. REULE
Soil Salinity four electrode conductivity relation ship for soils of the Northern Great plains.
Soil Sc. Soc. Am. Vol. 41 - 1977 -

(18) SUSINI (J.) et ROUALT (M.)

Essais d'utilisation en analyse des sols salés d'une électrode sensible aux ions sodium.

Cahiers ORSTOM Vol. X n° 3 - 1972 -

(19) SUSINI (J.) et LOYER (J.Y.)

Réalisation d'un ensemble automatique pour la mesure en continu et "in situ" du pH, du Eh, et du pNa du sol.

ORSTOM, Mission Tunisie - 1977 - 1ère Partie.